

33-0077/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTEN
VON FASERBEWEHRTEM BETON BEI BEANSPRU-
CHUNG DURCH TIEFE TEMPERATUREN

Bericht

erstattet von

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dr.-Ing. G. Wiedemann

B I B L I O T H E K

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, April 1983

Postsendungen:
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig
Erfüllungsort und Gerichtsstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 5451

Fernschreiber: 6 52 693 165th n
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht über an einzelne Mitarbeiter.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

1. EINLEITUNG

- 1.1 Zur Lagerung von verflüssigtem Erdgas
- 1.2 Problemstellung der Versuche

2. VERSUCHSPROGRAMM

- 2.1 Idealisierung der Temperatur-Zeit-Geschichten
- 2.2 Vorgesehene Untersuchungen

3. BAUSTOFFE

4. HERSTELLUNG UND LAGERUNG DER PROBEKÖRPER

5. PRÜF- UND MESSTECHNIK

- 5.1 Abkühlung und Erwärmung
- 5.2 Messung der Temperaturdehnungen
- 5.3 Prüfung von Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur
- 5.4 Prüfung von Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

6. VERSUCHSERGEBNISSE

- 6.1 Thermisches Dehnverhalten
- 6.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur
- 6.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

7. ZUSAMMENFASSUNG

8. LITERATUR

VORWORT

Bekanntlich kann durch die Zugabe von Stahlfasern nicht nur die Festigkeit von Normalbeton sondern vor allem dessen Arbeitsvermögen auf Druck im postkritischen Beanspruchungsbereich deutlich erhöht werden. Diese Erhöhung der Zähigkeit [1] des Betons hängt mit der Fähigkeit der Fasern zusammen, die Mikrorisse wirksam zu vernähen und damit deren Ausbreitung in der Bruchphase zu bremsen. Gerade die Eigenschaft führte zur Frage, ob es durch Stahlfasern gelingen könnte, der Entfestigung von feuchtem Beton durch Tieftemperaturzyklen entgegenzuwirken. Dieser Frage wird in der vorliegenden Pilotstudie nachgegangen, die mit Mitteln des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. gefördert wurde. Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Bonzel, Forschungsinstitut der Zementindustrie, sei für diese Unterstützung herzlich gedankt.

Die Verfasser

1. EINLEITUNG

1.1 Zur Lagerung von verflüssigtem Erdgas

Die bedrohliche Entwicklung der Weltenergiesituation, steigende Rohölpreise und verschärfte Umweltschutzbestimmungen haben die Suche nach alternativen natürlichen Energieträgern notwendig gemacht. Zur Deckung des Energiebedarfs wird in immer stärkerem Umfang auch Erdgas mit herangezogen. Die Ausbeutung von kleineren Erdgasfeldern (z.B. in der Nordsee) ist bereits in den Bereich der technisch wirtschaftlichen Realisierbarkeit gelangt. Auch das Begleitgas bei Erdölbohrungen, das bisher nutzlos abgefackelt wurde, wird heute dringend benötigt.

Natürliches Erdgas ist ein Gemisch aus ca. 90 % Methan, anderen Kohlenwasserstoffverbindungen und Stickstoff. Erdgas bringt kaum Luftverschmutzungsprobleme mit sich, ist ungiftig und besitzt i.d.R. mehr als den doppelten Heizwert von Kokereigas. Wie bei vielen anderen Rohstoffen, muß auch Erdgas häufig über große Entfernungen den Verbrauchermärkten zugeführt werden. Große Tiefen im Meer, Ländergrenzen, Verbrauchsschwankungen u.a.m. machen Rohrleitungen schnell unwirtschaftlich. Kostengünstiger ist es dann, Erdgas im flüssigen Aggregatzustand zu transportieren und zu speichern, da sich die Volumina gleicher Gasmengen vor und nach der Verflüssigung wie 600 : 1 verhalten. Das verflüssigte Erdgas, das LNG (liquefied natural gas) genannt wird, besitzt allerdings unter atmosphärischem Druck eine Temperatur von -162°C , weshalb zum Transport und zur Speicherung Spezialbehälter erforderlich sind. Auf dem Wege von der Quelle zum Verbraucher durchläuft das Erdgas folgende Stationen:

Pipeline → Verflüssigungsanlage → Zwischenlagerung in isolierten Tanks → Übergabe an LNG-Carrier → Seetransport → Übernahme im Empfangshafen → erneute Zwischenlagerung → Wiedervergasung → Übergabe an ein überregionales oder regionales Pipelinenetz.

Neben dem LNG müssen heute in zunehmendem Maße auch große Mengen tiefkalter, verflüssigter Industriegase gelagert werden. Nachfolgend werden einige wichtige Gase und ihre Siedetemperaturen aufgeführt:

- Äthylen	-104° C
- Äthan	- 89° C
- Propylen	- 48° C
- Ammoniak	- 33° C
- Stickstoff	-196° C
- Sauerstoff	-183° C
- Butan	- 11° C

Die Verflüssigung von Gas ist eine erprobte Technologie. Die Lagerung des sehr kalten Gases hingegen stellte und stellt die Bauindustrie vor schwierige materialtechnische und konstruktive Probleme.

Speicherbehälter werden aus Gründen der Sicherheit in der Regel zweischalig gebaut (s. Bild 1.1). Man spricht dann von einem "double containment" bzw. von einem "double integrity system" [2] [3] [4]. Das eigentliche Lagerbehältnis, der Innenbehälter, muß aus kaltzähem Material errichtet werden, da er die Temperatur des verflüssigten Gases annimmt. Alternativ bieten sich hier 9%-iger Nickelstahl oder Spannbeton mit stählerner Dichthaut an. Den Innenbehälter umschließt der

Außenbehälter aus Stahl- oder Spannbeton, der Schutz gegen außergewöhnliche externe Lastfälle (Brand in Tanknähe, Flugzeugabsturz etc.) gewährt. Bei Leckage des Innentanks unterbindet er das Freisetzen von Gas in der Luft. Die Wärmedämmung im Ringspalt zwischen Außen- und Innenbehälter begrenzt das Eindringen von Wärme und damit Energieverluste.

Durch kontrolliertes und graduelles Kaltfahren bei der Erstbefüllung wird der Temperaturzwang für den Innentank klein gehalten. Aus betrieblichen Gründen und in Störfällen kann die vollständige Entleerung des Speichers notwendig werden, der eine erneute Befüllung folgt. Es liegt dann eine Temperaturwechselbeanspruchung der Innentankkonstruktion vor. Der Außenbehälter ist im Regelbetrieb "warm"; es herrscht in ihm ein nur mäßiges Temperaturgefälle. Im Störfall einer Leckage des Innentanks kann es zu einer örtlichen und plötzlichen Abkühlung des Wandbetons kommen, die als Kälteschock bezeichnet wird. Neuere Wärmedämmsysteme zwischen den Behältern sollen diesen Kälteschock mildern oder gar verhindern.

Aus Gründen der Sicherheit bietet sich sowohl für den Innen- als auch für den Außentank der Baustoff Spannbeton an, der nicht nur über einen hohen Brandwiderstand, sondern auch über eine hohe Rißzähigkeit verfügt.

1.2 Problemstellung der Versuche

Für die Auslegung z. B. eines LNG-Behälters in Spannbeton benötigt der Konstrukteur Angaben über das

kryogene Werkstoffverhalten der Konstruktionswerkstoffe. Für den Beton, der in dieser Arbeit ausschließlich behandelt werden soll, ergeben sich somit folgende Fragen:

Wie verändert sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei Tieftemperatur?

Welchen Einfluß üben ein- oder mehrmalige Temperaturwechsel aus?

Welche Bindemittel, Zuschläge und welche Betonzusammensetzungen zeigen unter langzeitiger oder wechselnder Temperatureinwirkung im werkstoffphysikalischen Sinne besonders gute Materialeigenschaften?

Kann der thermischen Zerrüttung von insbesondere feuchtem Beton durch die Zugabe von Stahlfasern entgegengewirkt werden?

Den ersten drei Fragen sind bereits zahlreiche Forscher nachgegangen, so daß deren Beantwortung weit gediehen ist. Überblicke hierzu vermitteln die Quellen [5 bis 10]; insbesondere [5] enthält den aktuellen Stand der Forschung.

Der Einsatz von Stahlfasern zur Faserarmierung von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton ist vor allem dann sinnvoll, wenn vom Tragwerk eine hohe Duktilität in kritischen Beanspruchungsfällen verlangt wird. Derartige Situationen liegen häufig dann vor, wenn dem Tragwerk extrem hohe Spannungs- und/oder Verzerrungsgeschwindigkeiten aufgezwungen werden. Bei einem LNG-Tank tritt dieser Fall auf, wenn durch einen lokalen

oder globalen Kälteschock extrem hohe Zwang- und Eigenspannungen mit minimaler Aufbauzeit eintreten. Es ist vorstellbar, die Stahlfaserarmierung dann an solchen Tragwerksbereichen einzusetzen, an denen eine feine Rißverteilung, gepaart mit hoher Duktilität, notwendig ist, um die Integrität von Dichthäuten zu sichern (Rißüberbrückung).

Darüber hinaus ist der Einsatz von Stahlfasern auch an solchen Stellen möglicherweise sinnvoll, die aus Platzgründen durch konstruktive, rißbeschränkende Bewehrungen nicht mehr zufriedenstellend durchdrungen werden können.

Betone hoher Feuchte erfahren durch zyklische Temperaturänderungen eine bleibende Entfestigung. Diese Entfestigung geht mit einer Mikrorissigkeit und mit beträchtlichen Gefügaufweitungen einher. Die Versuche sollten deshalb auch klären, ob mit einer Stahlfaserzugabe diesen Effekten gegengesteuert werden kann.

Für die Untersuchung des mechanischen Verhaltens des Betons ist es notwendig, die Temperatur-Zeitverläufe des Regelbetriebs und von Störfällen, die mit Tieftemperatur verbunden sind, im Versuch zu simulieren. Bild 2.1 zeigt die Temperaturbeanspruchungen, die den Versuchen zugrunde gelegt werden können.

Der Innenbehälter weist im Regelbetrieb dauernd -165°C auf. Langsame Tieftemperaturzyklen simulieren das mehrfache Kalt- und Warmfahren. Der im Regelbetrieb dauernd warme Spannbetonaußenbehälter wird im Störfall örtlich oder auch großflächig schockartig abgekühlt. Der zyklische Schock ist eher unwahrscheinlich.

Bei einem LNG-Tank, dessen Innenbehälter aus Spannbeton besteht, wird der Beton im bestimmungsgemäßen Betrieb auf die LNG-Temperatur von rd -165°C abgekühlt. Dies erfolgt bei Inbetriebnahme durch ein langsames und kontrolliertes Kaltfahren des Behälters, der dann unter der Dauertemperatur von -165°C steht. Da man aber auch damit rechnen muß, daß ein Spannbetoninnenbehälter während seiner Betriebsdauer mehrere Male z. B. inspiziert werden muß und dabei auf RT warmgefahren wird, sind auch einige Temperaturwechsel zu berücksichtigen, die dann eine Spanne von $\Delta t = 185^{\circ}\text{C}$ aufweisen.

Im Störfall lokaler oder globaler Leckage des Innenbehälters kommt der Außenbehälter mit dem tiefkalten LNG in Kontakt. Es werden dabei hohe Abkühlgeschwindigkeiten auftreten.

Versuche [5] haben gezeigt, daß der schädigende Einfluß von Temperaturwechseln mit Abnahme der Temperatur

\dot{v}_u zunimmt. Es stellte sich jedoch heraus, daß tiefere Temperaturen als -70°C keine weiteren temperaturbedingten Schäden erzeugen, weil der Phasenübergang Wasser zu Eis bis zu rd -70 bis -80°C vollständig abgeschlossen ist. Aus diesem Grunde wurde für die geregelten Tieftemperaturzyklen \dot{v}_u zu -70°C gewählt. Die Abkühl- und Erwärmungsgeschwindigkeiten wurden zu 2K/min. festgelegt. Die Haltezeit betrug rd 2 Stdn. ; die Meß- = Regelgröße ist die Körpermittentemperatur. Für die Untersuchung des Temperaturdehnverhaltens wurde \dot{v}_u allerdings zu -170°C gewählt; $\dot{v} = 1\text{ K/min.}$

Zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Beton bei tiefer Temperatur wurde geregelt auf -170°C abgekühlt. Die schockartige Abkühlung wurde hier nicht einbezogen.

2.2 Vorgesehene Untersuchungen

Zur Klärung des mechanischen Verhaltens von Normalbeton mit und ohne Stahlfaserzugabe bei geregelter Abkühlung auf die Prüftemperatur im unbelasteten Zustand und anschließender Prüfung bei Tieftemperatur werden bestimmt:

- Zylinderdruckfestigkeit ($\emptyset 8\text{ cm}/16\text{ cm}$)
- Spaltzugfestigkeit ($\emptyset 8/8\text{ cm}$)
- Spannungsdehnungslinie ($\emptyset 8/16\text{ cm}$)
- Druck-E-Modul (Sekante bis $\beta_c/3$)

Das Temperaturdehnverhalten der Probekörper wird bei geregelter Abkühlung und Erwärmung im einmaligen Zyklus $+20^{\circ}\text{C}/-170^{\circ}\text{C}/+20^{\circ}\text{C}$ an zylindrischen Proben $\emptyset 8/16\text{ cm}$ gemessen (Regel- = Meßgröße = Körpermittentemperatur).

Das mechanische Verhalten von Beton im Anschluß an n geregelte Tieftemperaturzyklen wird bei RT untersucht. Hierdurch läßt sich der ggf. schädigende Einfluß der Frost-Tauwechsel aufzeigen. Es wurden i. w. die oben angeführten Versuche durchgeführt.

Folgende Variable wurden erfaßt:

- a) Zementart PZ und HOZ; Festigkeitsklasse 35
- b) Faserart, gekennzeichnet durch Länge, Durchmesser und Endverankerung; Stahlfasern zweier Hersteller
- c) Fasergehalt in Vol.-%
0; 1,0 und 2,0 Vol.-%
- d) Feuchtezustand der Probekörper nach Lagerung der Probekörper bei einem definierten Klima bis zur Prüfung (Alter rd 100 d)
- e) Anzahl der Tieftemperaturzyklen

Vorversuche haben ergeben, daß nur bei Lagerung der Proben unter Wasser bis zur Prüfung signifikante Unterschiede im TT-Verhalten von Normal- und Faserbeton auftreten. Aus diesem Grunde wurde nur die Lagerungsart "unter Wasser" einbezogen.

3. BAUSTOFFE

Es wurde ein Beton angestrebt, dessen Zylinderdruckfestigkeit im Prüfalter von rd 100 d nach dauernder Feuchtlagerung rd 40-45 N/mm² betragen sollte. Folgende Baustoffe und Zusammensetzungen wurden gewählt:

a) Zemente

Es wurden zwei Normzemente nach DIN 1164 ausgewählt, nämlich PZ 35 F und HOZ 35 L NWHSNA. Tab. 3.1 enthält die wesentlichen Daten.

Tabelle 3.1: Verwendete Zemente (Teutonia, Hannover)

Art und Festigkeitsklasse	Portlandzementklinker [%]	Hochofenschlacke [%]	Gips-Anhydrit-gemisch [%]	Mahlfeinheit (Blaine) [cm ² /g]	Erstarrungsbeginn ende		Wasseranspruch [Gew.-%]	2 7 28 Tage Tage Tage Druckfestigkeit [N/mm ²]			Klinkerphasen			
					[Std.]	[Std.]					C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	C ₄ AF
PZ 35F	95,5	—	4,5	3077	2,3	3,3	24,5	22,1	34,4	47,0	66,9	8,6	10,5	5,3
HOZ 35L														
NWHSNA	22	71	7	3046	3,5	5,0	27,5		26,9	44,0				

b) Zuschlag

Der Betonzuschlag (quarzitischer Kies aus Sonnenberg bei Braunschweig) wurde als trockene Körnung in 3 Korngruppen getrennt wie folgt in GT zusammengesetzt:

0/2 : 34 %; 2/8 : 26 %; 8/16 : 40 %.

c) Fasern

Von den Stahlfaserherstellern Trefil Arbed und Bekaert wurden folgende Fasertypen bezogen und verwendet (Tab. 3.2):

Tabelle 3.2: Verwendete Stahlfasern

Hersteller und Marke	Typ	Länge mm	Durchmesser mm	L — D	Form, Oberfläche
Trefil Arbed WIREX	0,4/12	12	0,4	30	gerade und blank
	0,4/25	25	0,4	62,5	
Bekaert	OL30/0,50	30	0,5	60	gerade und blank
DRAMIX	ZP30/0,50	30	0,5	60	an den Enden gekröpft, blank, spezialverklebt
	ZC30/0,50	30	0,5	60	an den Enden gekröpft, blank, normalverklebt

d) Betonzusammensetzung

Der Beton wurde in GT wie folgt zusammengesetzt:

$Z : G : W = 1 : 5,3 : 0,54$. Die Faserzugabe wurde bei der Stoffraumrechnung unberücksichtigt gelassen.

Das Ausbreitmaß des Normalbetons betrug rd 35 bis 36 cm; das Verdichtungsmaß lag zwischen 1,10 und 1,15. Durch Zugabe von Stahlfasern zum fertig gemischten Normalbeton stieg das Verdichtungsmaß auf 1,20 bis 1,25 an.

Nach Füllen der Schalungen der Normalbetonkörper und nach deren Verdichtung wurden die Stahlfasern in die zweite Hälfte der Mischerfüllung bei laufendem Mischer von Hand eingerieselt. Die Vereinzelung der zusammengeklebten Fasertypen ZP und ZC wurde erreicht; eine Igelbildung trat nicht auf.

4. HERSTELLUNG UND LAGERUNG DER PROBEKÖRPER

Um eine möglichst homogene Temperaturverteilung innerhalb des Probekörpers zu gewährleisten und um die Wärmespannungen infolge von Temperaturgradienten klein zu halten, wurde ein zylindrischer Probekörper mit $\varnothing 8$ cm gewählt. Die Probekörper wurden in Stahlschalungen hergestellt, die das gleichzeitige Herstellen und Verdichten von 20 Betonprobekörpern erlaubten. In je 10 Schalungen wurde Normalbeton und in je 10 Schalungen wurde Faserbeton eingebracht. Die Schalungsbatterie wurde auf dem Rütteltisch verdichtet. Zwei Batterien à 20 Körper wurden so je Termin betoniert. Unmittelbar nach dem Ausschalen im Alter von 2 Tagen erfolgte eine siebentägige Wasserlagerung. Dann wurden die Probekörper durch Sägen und planparalleles Schleifen in

Abschnitte für die Einzeluntersuchungen unterteilt (Bild 4.1). Anschließend erfolgte die Lagerung unter Wasser bis zum Versuchsbeginn, zu dem die Probekörper ein Alter von 100 bis 140 Tagen aufwiesen.

5. PRÜF- UND MESSTECHNIK

Es existieren zur Zeit noch keine genormten Methoden zur Prüfung und Messung der mechanischen Eigenschaften von Beton bei Tieftemperatur. Aus diesem Grund ist die Beschreibung der im Rahmen dieser Versuche angewandten Methoden notwendig.

5.1 Abkühlung und Erwärmung

Abkühlung bzw. Erwärmung der Probekörper erfolgt in einer Tiefkühlkammer, in der mit einstellbaren Abkühl- bzw. Erwärmungsgeschwindigkeiten beliebige Temperaturen zwischen -200 und $+20^{\circ}\text{C}$ erzeugt werden können.

Die Anlage (s. Bild 5.1) besteht aus:

- a) Tiefkühlkammer
- b) Temperaturmeß- und -regelgerät
- c) Programmgeber für Temperatur-Zeitverläufe
- d) Tank für flüssigen Stickstoff
- e) Zweikanal-Linienschreiber zur Registrierung der Temperatur
- f) x-y-Schreiber zur Registrierung von Temperatur und Dehnung.

Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur werden in der Kammer durch dosierte Injektionen von verflüssigtem Stickstoff erzeugt. Der Stickstoff wird mit Hilfe eines Propellers im Kühlraum zerstäubt. Zur geregelten Erwärmung ist ein Heizungselement eingebaut. Das Meß- und

Regelgerät ermöglicht temperatur-zeitgesteuerte Abkühlvorgänge mit definierter Abkühlgeschwindigkeit. Als Regelgröße kann sowohl die Kammer- als auch jede beliebige Körpertemperatur gewählt werden. Hier wurde die Körpermittentemperatur als Regel- = Meßgröße festgelegt (s. auch Bild 5.5).

5.2 Messung der Temperaturdehnungen

Die Messung der Temperaturdehnungen von Beton erfolgte an zylindrischen Proben mit \varnothing 8/16 cm im erstmaligen Zyklus zwischen $+20^{\circ}\text{C}/-170^{\circ}\text{C}/+20^{\circ}\text{C}$. Abkühlung und Erwärmung erfolgten geregelt mit 1 K/min., um die Differenz zwischen Oberflächen- und Mittentemperatur klein zu halten (bezgl. Auswirkung s. [5] und [11]).

Die Bilder 5.2 und 5.3 zeigen die angewandte Apparatur, mit der bezüglich Handhabung, Meßgenauigkeit etc. die besten Ergebnisse erzielt werden. Ein Rohr aus Quarzglas wird durch eine zylindrische Öffnung in die Tiefkühlkammer eingeführt. Am oberen Ende des Rohres ist auf einem Deckel ein induktiver Wegaufnehmer befestigt. An das untere Ende des Rohres ist ein verschweißter Rahmen aus Quarzglasstäben angeschweißt. Ein Stab aus Quarzglas, der mittig und reibungsfrei in dem Rohr geführt wird, tastet die obere Stirnfläche des Betonprobekörpers, der in dem Rahmen steht, an und überträgt die Längenänderung des Probekörpers auf den induktiven Wegaufnehmer. Zur Überprüfung der Meßgenauigkeit wurde statt des Betonprobekörpers ein Zylinder aus Quarzglas in das Gerät eingebaut. Bei der Abkühlung der Tiefkühlkammer wurden nun lediglich Dehnungswerte aufgezeichnet, die bedenkenlos vernachlässigt werden können (max. $\pm 0,01\%$). Wird nun die Temperaturdehnung eines Betonprobekörpers gemessen,

muß die Meßkurve wieder um die Eigendehnung eines Quarz-zylinders gleicher Länge korrigiert werden (s. Bild 5.4).

Es ist sehr wichtig, daß die Meßapparatur nach dem Verschweißen der Einzelteile sorgfältig spannungsfrei ge-glüht wird, da sonst beim Abkühlen Verformungen des Rah-mens auftreten können, die die Meßergebnisse verfälschen.

Mit der beschriebenen Meßapparatur lassen sich bei stu-fenweiser Abkühlung und Halten der Temperatur bis eine stationäre Temperaturverteilung erreicht ist, Einzelmeß-werte der Längenänderung des Probekörpers aufnehmen. Das Temperaturdehnverhalten kann aber auch kontinuierlich gemessen werden, wenn die Kammer programmiert mit einer bestimmten Abkühlgeschwindigkeit gefahren wird.

Bild 5.5 zeigt beispielhaft die Temperatur-Zeitkurven an verschiedenen Meßorten; dabei wurde mit 2 K/min. abge-kühlt bzw. erwärmt. Bei einer Geschwindigkeit von 1 K/min., wie sie bei diesen Versuchen angewandt wurde, sind die Ab-weichungen zwischen Kammer- und Körpertemperatur deut-lich geringer. Die Temperaturmessung erfolgt mit Fe-Kon-stantan Thermoelementen nach DIN 43710 mit angeschweiß-ter Thermoperle.

5.3 Prüfung von Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

Zur Prüfung der Druckfestigkeit und zur Aufnahme der Spannungs-Dehnungs-Linien, befinden sich die Probekörper in der Temperaturkammer. Sie werden von den Häuptern der Druckprüfmaschine aus über Stahl-Druckstempel, die durch Öffnungen im Boden und der Decke der Kammer geführt sind, belastet (Bild 5.6). Ein Kugelgelenk zwischen dem oberen

Stahlstempel und dem Probekörper sorgt für zentrische Lasteintragung. Die Prüfmaschine wird weggesteuert gefahren, um vollständige σ - ϵ -Linien mit fallendem Ast aufnehmen zu können. Die lastabhängige Dehnung wird auf dem Probekörper mit 3 elektrischen Dehnmeßstreifen (im Winkel von 120°) gemessen. Die Prüfung erfolgt stets im stationären Temperaturzustand des Probekörpers (isothermischer Versuch), so daß bei der Widerstandsänderung des DMS

$$\frac{\Delta R}{R} = k (\epsilon_{\text{mech}} + \epsilon_T)$$

mit

ϵ_{mech}	lastabhängige Dehnung
ϵ_T	scheinbare Dehnung des Streifens bei Temperaturänderung
k	temperaturabhängiger Faktor

die temperaturabhängige scheinbare Dehnung nicht berücksichtigt zu werden braucht. Da die Temperaturen der Meßstreifen aber wegen der diskontinuierlichen Einspritzung des flüssigen Stockstoffs geringfügig schwanken können, wurde zur Temperaturkompensation ein weiterer Probekörper mit 3 DMS unmittelbar neben den Prüfling in die Kammer gestellt.

Zur Messung von Lastdehnungen sollen nur solche DMS verwendet werden, die von Hause aus eine kleine temperaturabhängige scheinbare Dehnung aufweisen. Hier wurden CrNi-DMS eingesetzt. Wie Bild 5.7 zeigt, ändert sich der scheinbare Dehnungsmeßwert bei geringer Temperaturänderung bei CrNi-DMS im Vergleich zu Konstantan-DMS nur unwesentlich. Daher sind diese für Tieftemperaturuntersuchungen erheblich besser geeignet. Die temperaturabhängige Änderung des k -Faktors,

die in die Untersuchungswerte eingerechnet werden muß, ist für die bei uns verwendeten CrNi-DMS in Bild 5.8 angegeben.

Vergleichende Messungen mit induktiven Wegaufnehmern am Prüfkörper sowie zwischen den Häuption der Prüfmaschine haben die Richtigkeit der mit DMS bei Tieftemperatur ermittelten Meßkurven bestätigt. Der Druckelastizitätsmodul ist hier grundsätzlich als Sekanten-Modul zwischen dem Ursprung und etwa einem Drittel der Festigkeit definiert. Die später dargestellten σ - ϵ -Linien enden an jenen Dehnungswerten, an denen die DMS infolge von Rißbildung im Beton, bzw. durch Ablösen ausfielen.

5.4 Prüfung von Festigkeit und Verformung nach TT-Zyklen

Die Probekörper werden entsprechend Abschn. 5.3 im Anschluß an n lastfreie Zyklen nach dem vollständigen Wiedererwärmen auf RT geprüft. Während der Zyklen, aber auch bei den Prüfungen nach Abschn. 5.3, sind Probekörper in Haushaltsfolie verpackt, um den anfänglichen Wassergehalt zu konservieren.

6. VERSUCHSERGEBNISSE

6.1 Thermisches Dehnverhalten

Das thermische Dehnverhalten von Beton ist aus mehreren Gründen von Bedeutung:

1. Die Dehnzahl im Tieftemperaturbereich muß für die Bauwerksbemessung bekannt sein, um Zwangbeanspruchungen vorhersagen zu können.
2. Stahl und Beton besitzen unterschiedliche Dehnzahlen. Dies führt zu innerem Zwang, der erfaßt werden muß.

3. Das thermische Dehnverhalten erweist sich als zuverlässiger Gradmesser struktureller Veränderungen infolge des Frostprozesses.

Bild 6.1 zeigt das typische Verhalten: Beton mäßiger Feuchte und Stahl weisen ein nahezu lineares, vollständig reversibles Verhalten auf, die Dehnungsdiskrepanz bleibt gering. Wassersatter Beton hingegen zeigt nach anfänglicher Kontraktion eine ausgeprägte Expansion zwischen -20 und -60°C . In diesem Temperaturbereich finden die von Setzer und Mitarbeitern [12] durch DTA-Messungen festgestellten diskontinuierlichen Phasenübergänge des Kapillar- und strukturierten Wassers statt. Ab rd -70°C ist die Eisbildung und Gefügaufweitung im wesentlichen abgeschlossen, und das eiserfüllte Mehrphasensystem kontrahiert in paralleler Weise zum normalgelagerten Beton. Beim Auftauen ist das Einsetzen der Schmelzvorgänge zu höheren Temperaturen hin verschoben. Dies verwundert nicht, denn das zuvorige Einfrieren hat zu einer Porenvergrößerung geführt, mit der sich auch der porenradienabhängige Schmelzpunkt verschiebt.

Die Frostzerstörung manifestiert sich als irreversible Gefügaufweitung am Ende des Temperaturzyklus. Im vom trockenen zum wassersatten Beton abgesteckten Feld liegt die Gesamtheit des möglichen Dehnungsverhaltens bei beliebigen Feuchten.

Die wesentlichen Parameter, die zur Frostzerstörung führen, sind die Masse des gefrierbaren Wassers und der Wasserzementwert; näheres s. in [5]. Da Vorversuche gezeigt haben, daß Probekörper aus Normal- und Faserbeton

nach Lagerung im Normklima 20/65 keine meßbaren bzw. signifikanten Unterschiede im thermischen Dehnverhalten aufwiesen, wurde nur noch das Dehnverhalten wassergelagerter Proben untersucht.

Die Bilder 6.2 bis 6.5 zeigen die Dehnkurven der mit Wirex-Fasern armierten PZ- und HOZ-Betone. Jede Dehnkurve stellt ein aus einer Serie von zwei bis drei identischen Versuchen ausgewähltes Einzelergebnis dar. Im Rahmen der des gewählten Fasergehalts üben die Länge und Stoffraummenge der Zugabe von glatten, 0,4 mm dicken Wirex-Fasern keinen signifikanten Einfluß auf das Dehnverhalten aus. Andeutungsweise scheint eine Faserzugabe von 2 Vol-% im Vergleich zu 1 Vol.-% mit einer etwas größeren Expansion bzw. irreversiblen Restdehnung bei RT verbunden zu sein.

Die Bilder 6.6 bis 6.11 zeigen die Dehnkurven der mit den Dramix-Fasern armierten PZ- und HOZ-Betone. Die Faserzugabe wirkt sich uneinheitlich aus. In keinem Fall führt sie zu einer Reduktion der Expansion und der irreversiblen Gefügaufwertung bei RT im Vergleich zum nicht-armierten Normalbeton. In den meisten Fällen ist das Gegenteil eingetreten.

Zur Aufklärung dieser Beobachtung werden die mittleren Feuchtgehalte u_m in M.-%, bezogen auf das Trockengewicht (Trocknen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz), benutzt. Die Expansion ist nämlich nach [5] näherungsweise proportional zur mittleren Feuchte u_m . Der Feuchtegehalt wurde im Anschluß an die Messung des thermischen Dehnverhaltens bestimmt.

Die Bilder 6.12 und 6.13 zeigen das Ergebnis der Auswertung. Sieht man von der recht groben Methode zur Bestimmung von u_m ab, so erkennt man, daß die Zunahme des Fasergehalts von 1 auf 2 Vol.-% i.d.R. auch mit einer Feuchtezunahme verbunden ist. Dies gilt jedoch nur für Fasern mit Längen von 25 und 30 mm. Bei der kurzen Wirexfaser mit 12 mm Länge tritt eine Zunahme von u_m weder beim PZ-Beton noch beim HOZ-Beton abhängig von Fasergehalt auf.

Die Bilder 6.14 und 6.15 zeigen den Zusammenhang zwischen der gesamten thermischen Expansion und der mittleren Feuchte. Die Expansion nimmt mit der Feuchte zu; die hohen Fasergehalte sind sowohl mit hohen Feuchtegehalten als auch mit einer großen Expansion verknüpft.

Folgende Erklärungen sind möglich: Es ist denkbar, daß die Fasern das kapillare Einsaugen von Wasser begünstigen und zwar um so mehr, je länger sie sind. Es ist aber vielmehr zu vermuten, daß - bei zwar unwesentlicher Zunahme des Verdichtungsmaßes - die nahezu vollständige Verdichtung mit zunehmendem Fasergehalt und bei langen Fasern nicht gelungen ist. Die Poren an den Oberflächen der Zylinder mit hohem Fasergehalt von 2 % lassen dies vermuten. Es ist also eine geringe zusätzliche Gefügeporigkeit entstanden.

Damit ist die geschilderte Beobachtung wohl keine echte Materialeigenschaft von Beton mit hohem Fasergehalt; sie ist sicher durch den geringen Durchmesser der Zylinder von 8 cm mit bedingt (Wandeffekt, Verdichtungsbehinderung).

Die größere Expansion von wassersattem HOZ-Beton (beachte die Ordinatenenteilung von Bild 6.15) ist eine bekannte Tatsache, die mit der Porenradienverteilung des HOZ-Zementsteins zusammenhängt (mehr Porosität im Bereich feiner Poren als PZ-Zementstein [5]).

6.2 Festigkeit und Verformung bei Tieftemperatur

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Faserbeton bei tiefen Temperaturen wurde nur in eingeschränktem Umfang untersucht.

Tab. 6.1 gibt zunächst einen Überblick über die mittleren Ausgangsfestigkeiten der Normal- und Faserbetone bei Raumtemperatur. Bild 6.16 zeigt die Spannungs-Dehnungslinien bei zentrischem Druck in Abhängigkeit von der Tieftemperatur für Normal- und Faserbeton.

6.3 Festigkeit und Verformung nach Tieftemperaturzyklen

Die Bilder 6.17 und 6.21 zeigen die Abhängigkeit der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit von der Anzahl der Tieftemperaturzyklen bis $\vartheta_u = -70^\circ \text{C}$. Die bei RT gemessene Restfestigkeit ist dabei jeweils auf die jungfräuliche Festigkeit bei RT bezogen worden, wodurch der relative Vergleich zwischen Normal- und Faserbeton möglich wird.

Sieht man von der unvermeidbaren Streuung der Ergebnisse ab, so läßt sich feststellen, daß durch die Faserzugabe die thermische Entfestigung durch TT-Zyklen vermindert wird. Diese Feststellung gilt für eine Faserzugabe von 1 Vol.-% einheitlich. Bei der kurzen, 12 mm langen WIREX-Faser nimmt dieser positive Effekt

auch mit zunehmendem Fasergehalt zu. Auch bei den längeren Fasern nimmt mit Zunahme des Fasergehalts die Schädigung ab; allerdings treten hier größere Streuungen auf. Eine Ausnahme ist bei der gekröpften Faser ZC 30/0,50 zu beobachten, bei der eine Zugabe von 2 Vol.-% mit einer gegenüber Normalbeton höheren Entfestigung verbunden ist. Wir meinen, unter Hinweis auf Abschn. 6.1, daß dieses Verhalten nicht werkstoffspezifisch ist, sondern mit der Verdichtung zusammenhängt.

In Bild 6.22 ist der Abfall der Spaltzugfestigkeit von der Zahl der Tieftemperaturzyklen dargestellt. Der Abfall wird durch Faserzugabe deutlich vermindert.

Die Bilder 6.23 bis 6.34 zeigen die Veränderung der Spannungs-Dehnungslinie des einachsig gedrückten Zylinders infolge von Tieftemperaturzyklen. Die σ - ϵ -Linie endet bei Ausfall der DMS. Nur bei den WIREX-Fasern 0,4/12 wurden die Zugaben 1 und 2 Vol.-% untersucht. Bei allen anderen, 25 und 30 mm langen Fasern wurde nur die Faserzugabe 1 Vol.-% erfaßt; selbstverständlich ist der Vergleich mit Normalbeton stets gegeben.

Zunächst zur allgemeinen Beobachtung: Die jungfräuliche Zylinderdruckfestigkeit des Faserbetons liegt stets über der des Normalbetons. Der Abstand schwankt, scheint aber mit Zunahme des Fasergehalts zuzunehmen. Die Druckdehnung an der Zylinderfestigkeit wird durch Faserzugabe erhöht.

Durch die Tieftemperaturzyklen sinkt die Festigkeit ab und die Dehnung bei β_c nimmt zu. Mit zunehmender Zyklen-

zahl wird die σ - ϵ -Linie verändert: es ändert sich die Anfangskrümmung bezüglich ihres Vorzeichens. Ab rd 0,7 der Zylinderdruckfestigkeit ändert sich die Krümmung erneut. Diese anfängliche Krümmungsänderung, die auch mit einer Abnahme des Elastizitätsmoduls einhergeht, ist durch Mikrorisse infolge des Frostschadens bedingt. Ab rd 0,5 β_c sind diese Mikrorisse wieder überdrückt. Diese Feststellungen gelten für Normalbeton und Faserbeton gleichermaßen.

Durch die Faserzugabe wird der Verlust an Druckfestigkeit infolge von TT-Zyklen deutlich vermindert. Auch der Abfall des E-Moduls ist geringer. Die Bruchdehnung nimmt gegenüber Normalbeton deutlich zu.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer Pilotstudie wurde das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton im Vergleich zu Normalbeton untersucht. Dabei lag das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf dem Verhalten von Beton, der mehreren Tieftemperaturzyklen mit einer Tieftemperatur von -70°C unterworfen wurde. Dabei zeigte sich, daß durch die Zugabe von Stahlfasern - verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Fasergeometrie - der Festigkeitsverlust durch Zyklen deutlich reduziert werden kann.

Tab. 6.1: Ausgangsfestigkeiten β_0 bei Raumtemperatur
(ohne Temperaturbeanspruchung)

Proben Nr.	Zement- art	Stahlfasern	Prüf- alter [Tagen]	β_D^+ [N/mm ²]	β_{SZ}^+ [N/mm ²]
1a	PZ	-	140	32,8	3,52
1b	PZ	Wirex 0,4/25 1 Vol.%	140	39,6	4,46
2a	HOZ	-	132	34,9	3,60
2b	HOZ	Wirex 0,4/25 1 Vol.%	132	39,9	4,13
3a	PZ	-	108	39,8	3,09
3b	PZ	Wirex 0,4/25 2 Vol.%	108	44,0	4,52
4a	PZ	-	121	38,6	3,55
4b	PZ	Dramix OL 30/50, 1 Vol.%	121	45,3	4,70
5a	HOZ	-	129	34,5	3,09
5b	HOZ	Dramix OL 30/50, 1 Vol.%	129	42,6	4,57

⁺ Mittelwert aus 3 Meßwerten

Betonzusammensetzung: 1 : 5,3 : 0,54 GT
alle Proben wassergesättigt

8. LITERATUR

- [1] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton.
beton 24 (1974), H. 3, S. 95/99 und H. 4, S. 137/141
- [2] Bruggeling, A.S.G.: Prestressed concrete for the storage
of liquefied gases. Viewpoint Publ. C & CA, London, 1981
- [3] Bomhard, H.: Beton für Behältersysteme zur Speicherung
flüssiger Gase - Wirklichkeiten, Möglichkeiten und Gren-
zen. Betontag 1981, Gesamtbericht, S. 407/422
- [4] Turner, F.H.: Concrete and Cryogenics.
Viewpoint Publ. C & CA, London, 1976
- [5] Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Fe-
stigkeit und Verformung von Beton. Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz, Techn. TU Braunschweig, Be-
richt Nr. 55, 1982
- [6] Rostásy, F.S., Schneider, U., Wiedemann, G.: Behaviour
of mortar and concrete at extremely low temperatures.
Cement and Concrete Research, Vol. 9, No. 3, 1979,
S. 365/376
- [7] Rostásy, F.S., Schneider, U., Wiedemann, G.: Ein Beitrag
zum Tieftemperaturverhalten von Zementmörtel und Beton.
Forschungsbeiträge für die Baupraxis (Kordina-Festschrift).
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1979, S. 115/131
- [8] Rostásy, F.S., Wiedemann, G.: Festigkeit und Verformung
von Beton bei sehr tiefer Temperatur, beton 30, Heft 2,
1980, S. 54/59
- [9] Rostásy, F.S., Weiß, R., Wiedemann, G.: Changes of pore
structure of cement mortars due to temperature. Cement and
Concrete Research, Vol.10, No.2, 1980, S. 157/164
- [10] Rostásy, F.S., Wiedemann, G.: Stress-strain-behaviour of
concrete at extremely low temperatures. Cement and Concrete
Research, Vol.10, No.4, 1980, S. 565/572
- [11] Wiedemann, G., Sprenger, K.-H.: Zur Messung der Temperatur-
dehnung von Beton und Stahl im Tieftemperaturbereich.
Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Nie-
dersachsen. Heft 20/21, 1980/81
- [12] Stockhausen, N., Dorner, H.W., Zech, B. and Setzer, M.J.:
Untersuchung von Gefriervorgängen im Zementstein mit Hilfe
der DTA. Cement and Concrete Research, Vol.9, No.6,
pp. 783/794, 1979

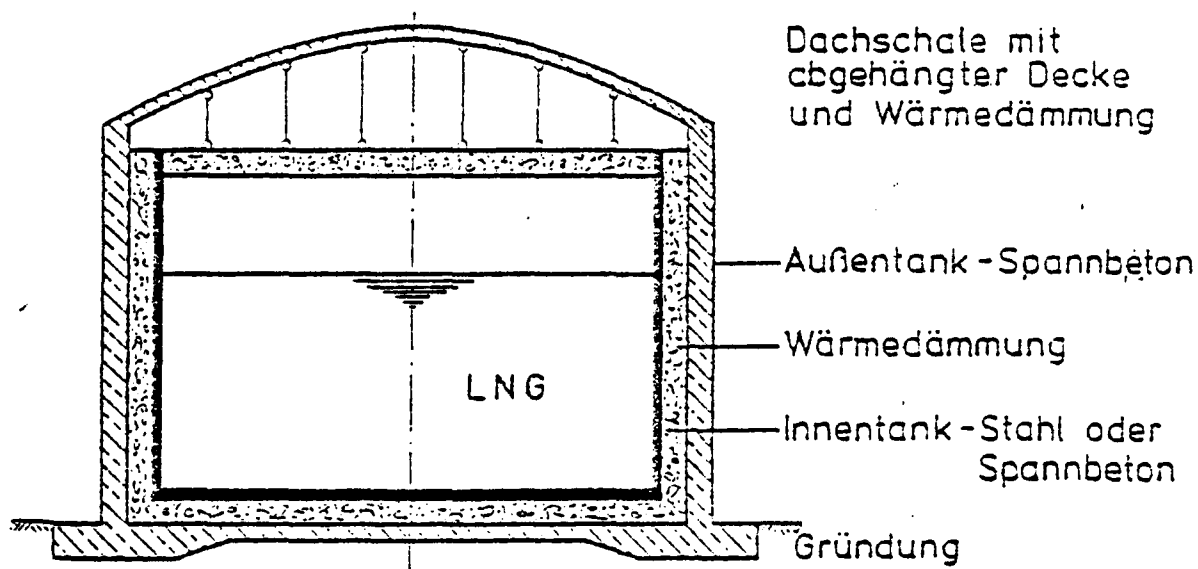


Bild 1.1

Aufbau eines LNG Lagerbehälters

Untersuchung	Temperaturbeanspruchung für :	
	Regelbetrieb	Störfall
Festigkeits - und Verformungsverhalten bei Tieftemperatur		
Einfluß von Temperaturwechseln		

Bild 2.1

Temperaturfälle zur Simulation der Zustände in Regelbetrieb und Störfall

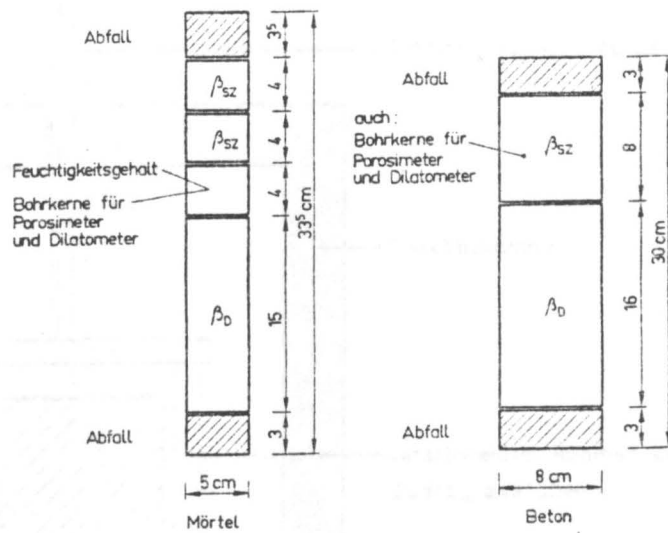


Bild 4.1

Abmessungen der zylindrischen Betonprobekörper

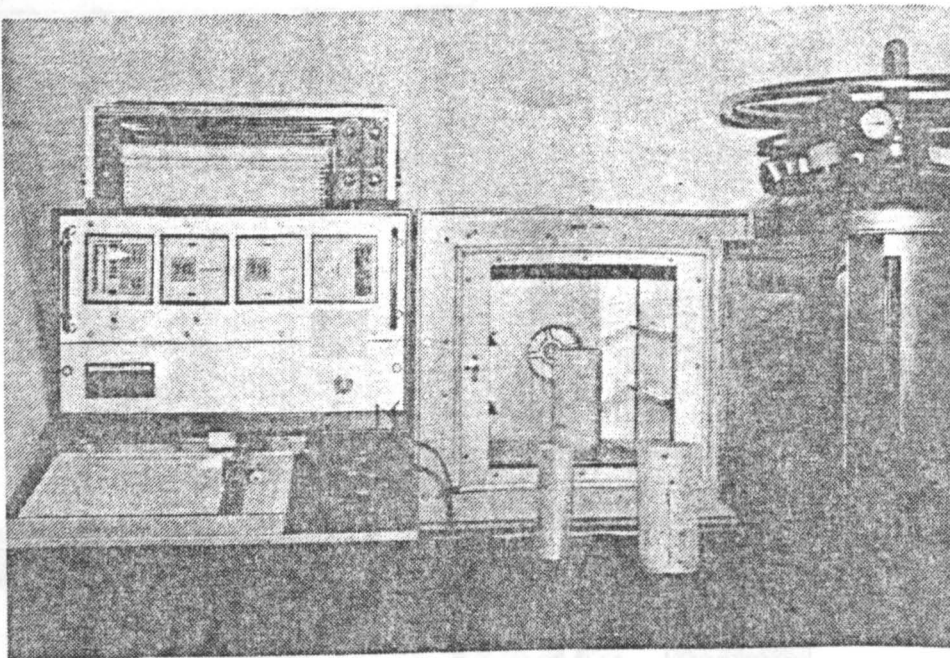


Bild 5.1

Tiefkühlkammer für Temperaturen von -200 bis $+20^{\circ}\text{C}$
mit Meß- und Regelgeräten

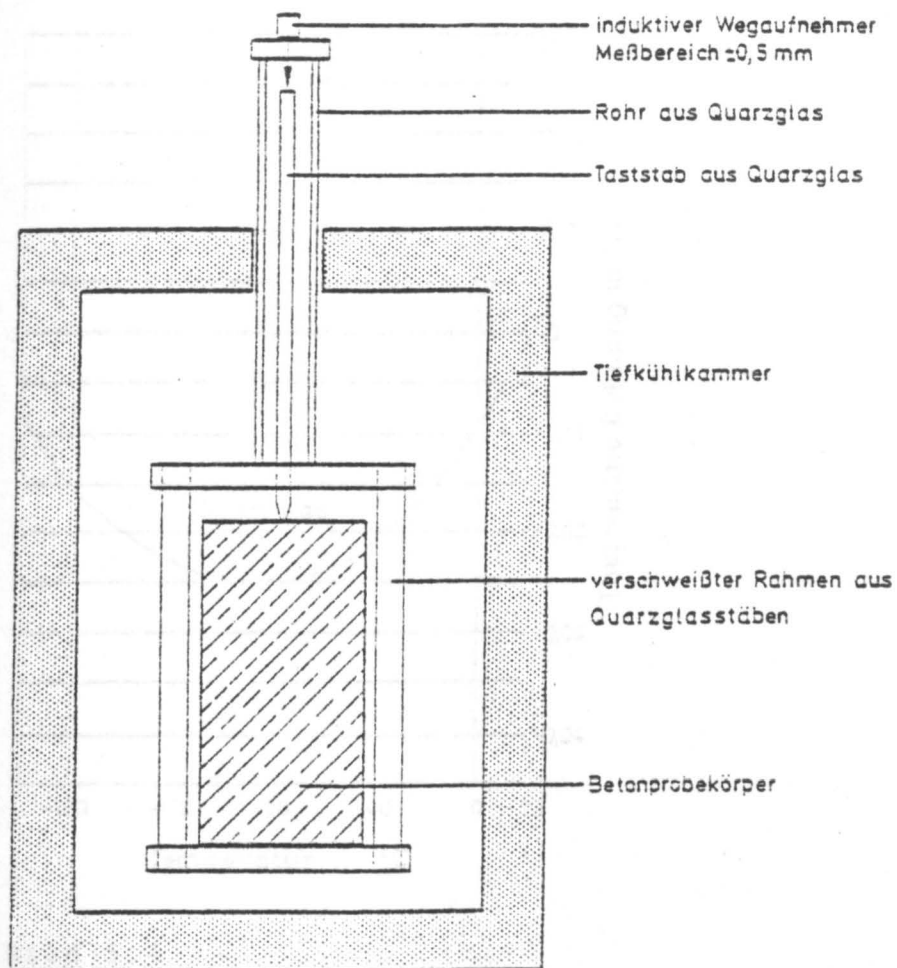


Bild 5.2

5.1

Tieftemperatur-Dilatometer für Betonprobekörper $d/h = 8/16 \text{ cm}$

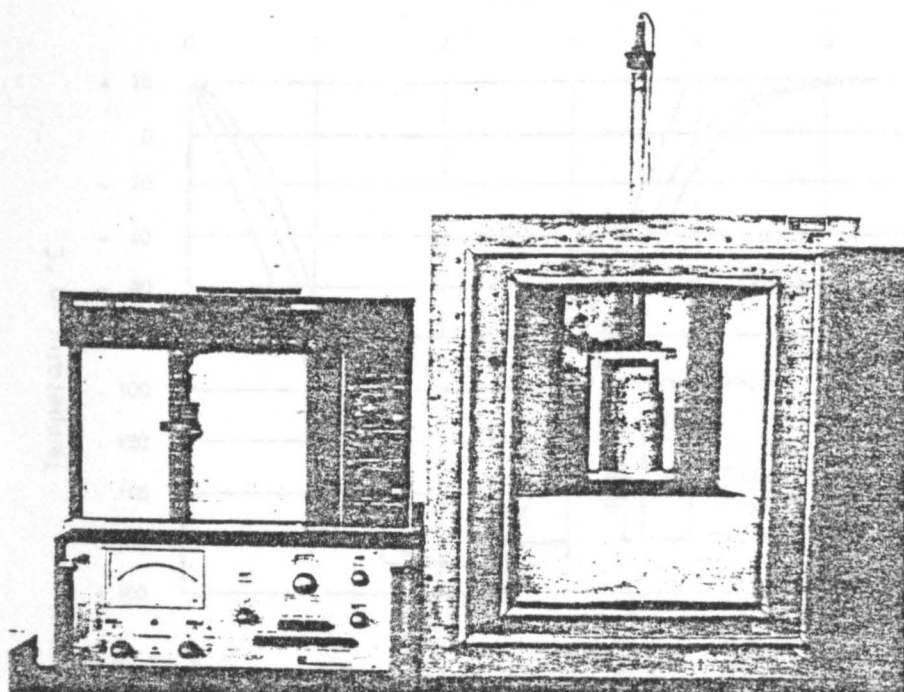


Bild 5.3

Tieftemperatur-Dilatometer, Photo des Meßplatzes

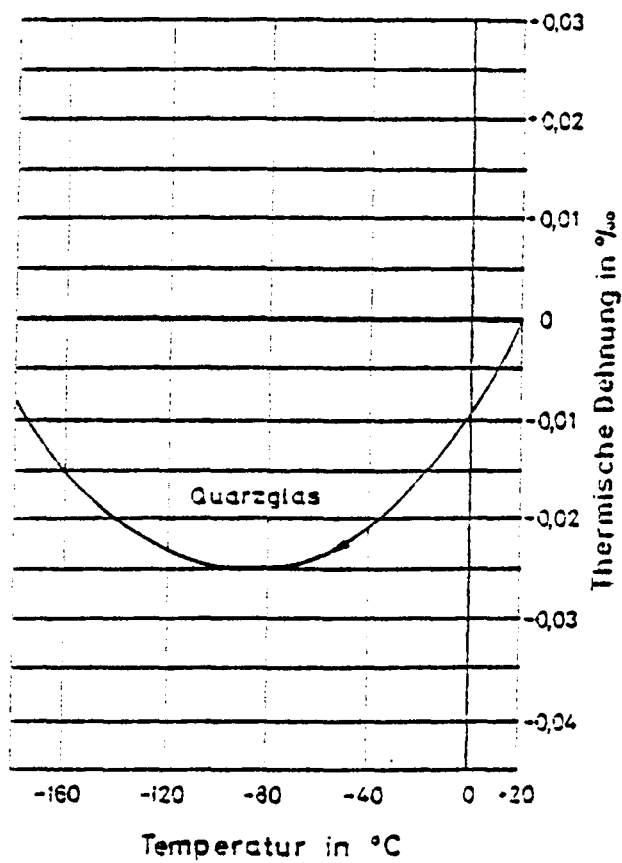


Bild 5.4

Temperaturdehnverhalten von Quarzglas

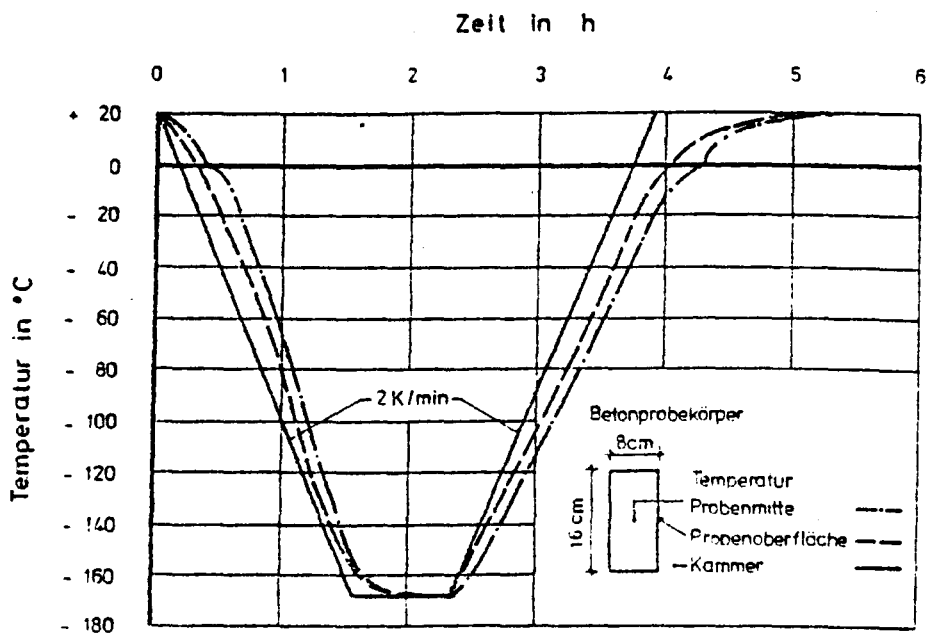


Bild 5.5

Temperaturzyklus gemessen mit Thermoelementen

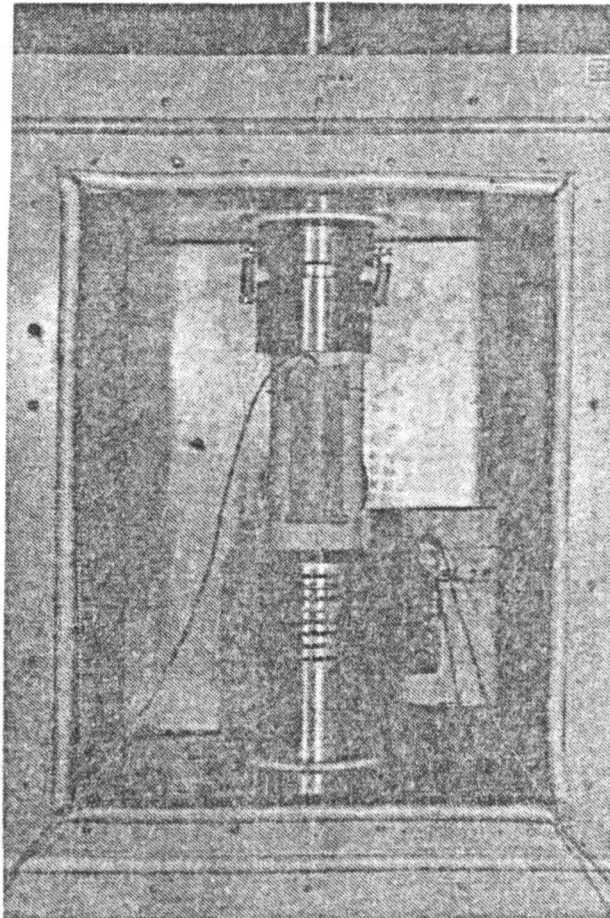


Bild 5.6

Versuchsaufbau mit Kältekammer (Druckprüfung)

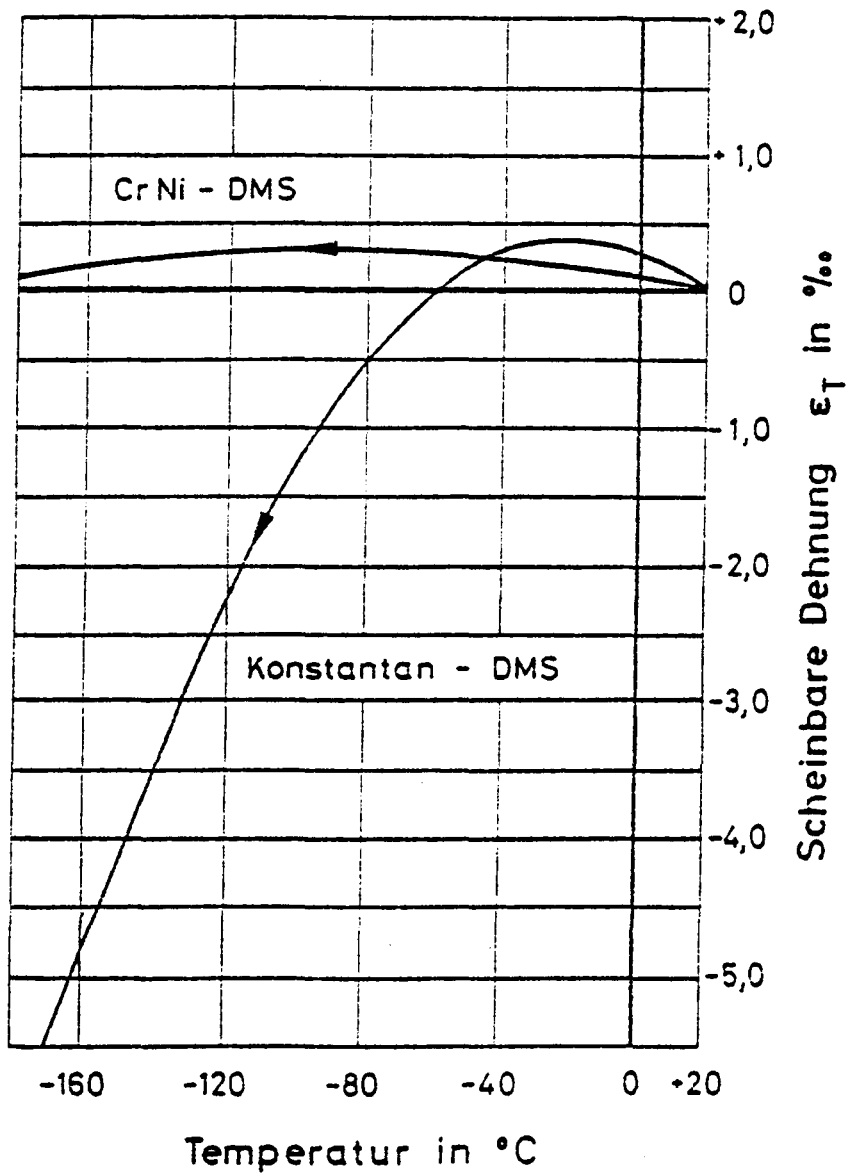


Bild 5.7

Scheinbare Dehnung ϵ_T von Dehnmeßstreifen als Funktion der Temperatur

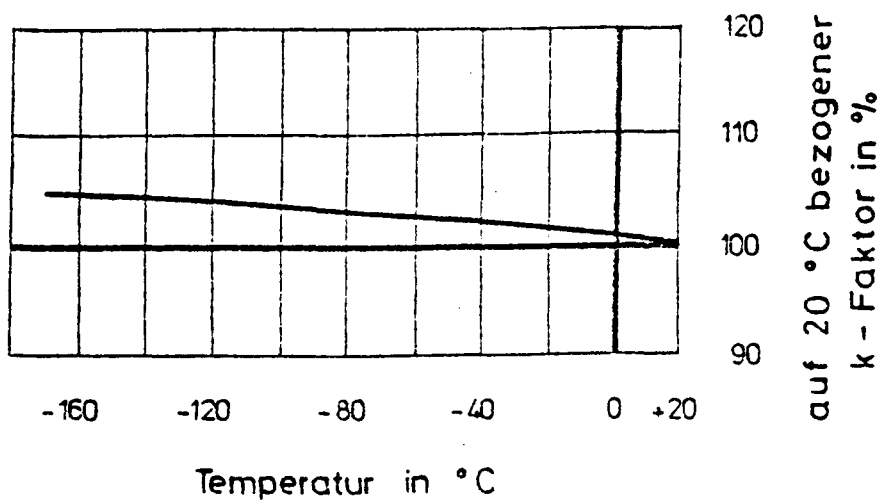


Bild 5.8

Relative Änderung des k-Faktors mit der Temperatur für

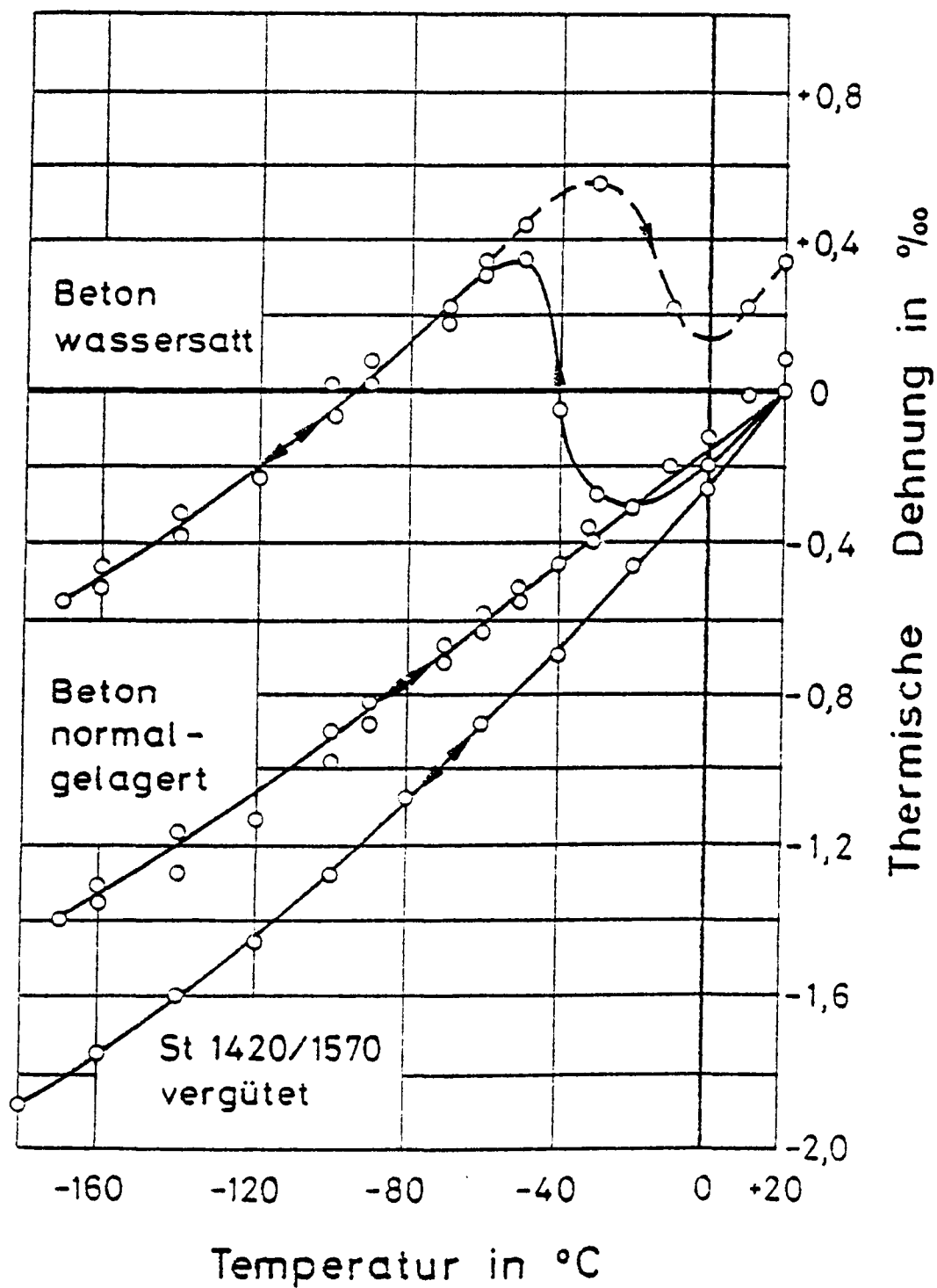


Bild 6.1

Thermische Dehnung von Spannstahl, normalgelagertem und wassersatttem Beton bei stationärer Temperaturverteilung über den Probekörper

Beton PZ 1 : 5,3 : 0,54 wassersatt Wirex 0,4 / 12

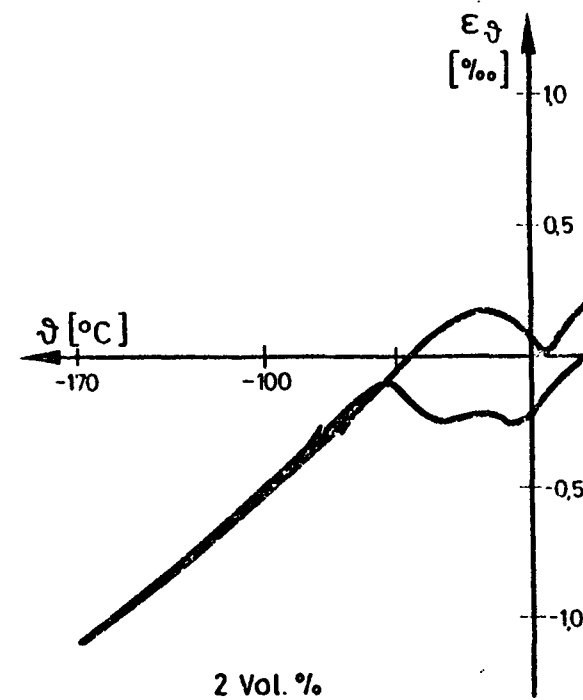
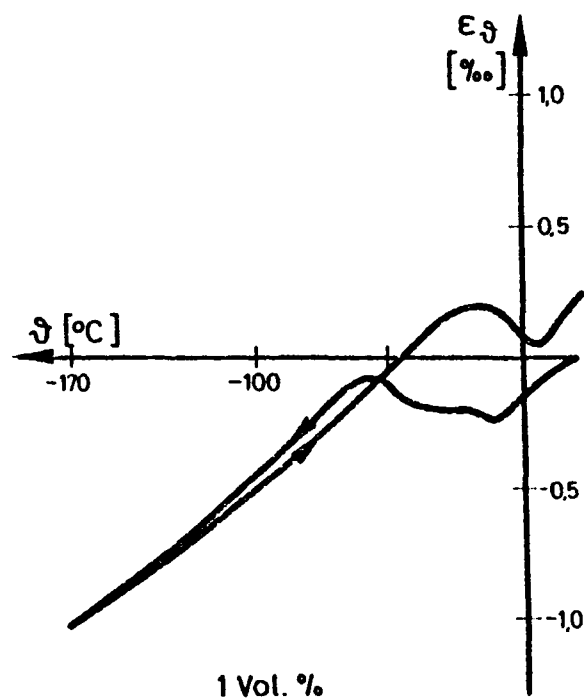
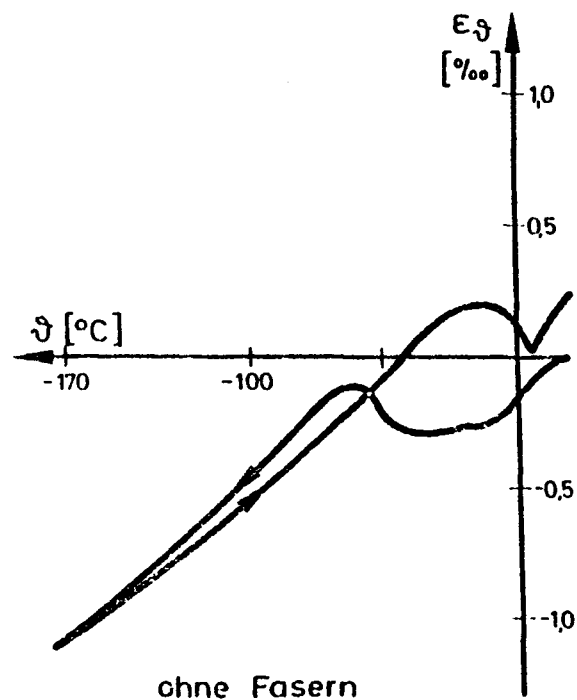


Bild 6.2: Thermisches Dehnverhalten von mit WIREX 0,4/12-Fasern armiertem PZ-Beton

Beton HOZ 1:5,3:0,54 wassersatt Wirex 0,4/12

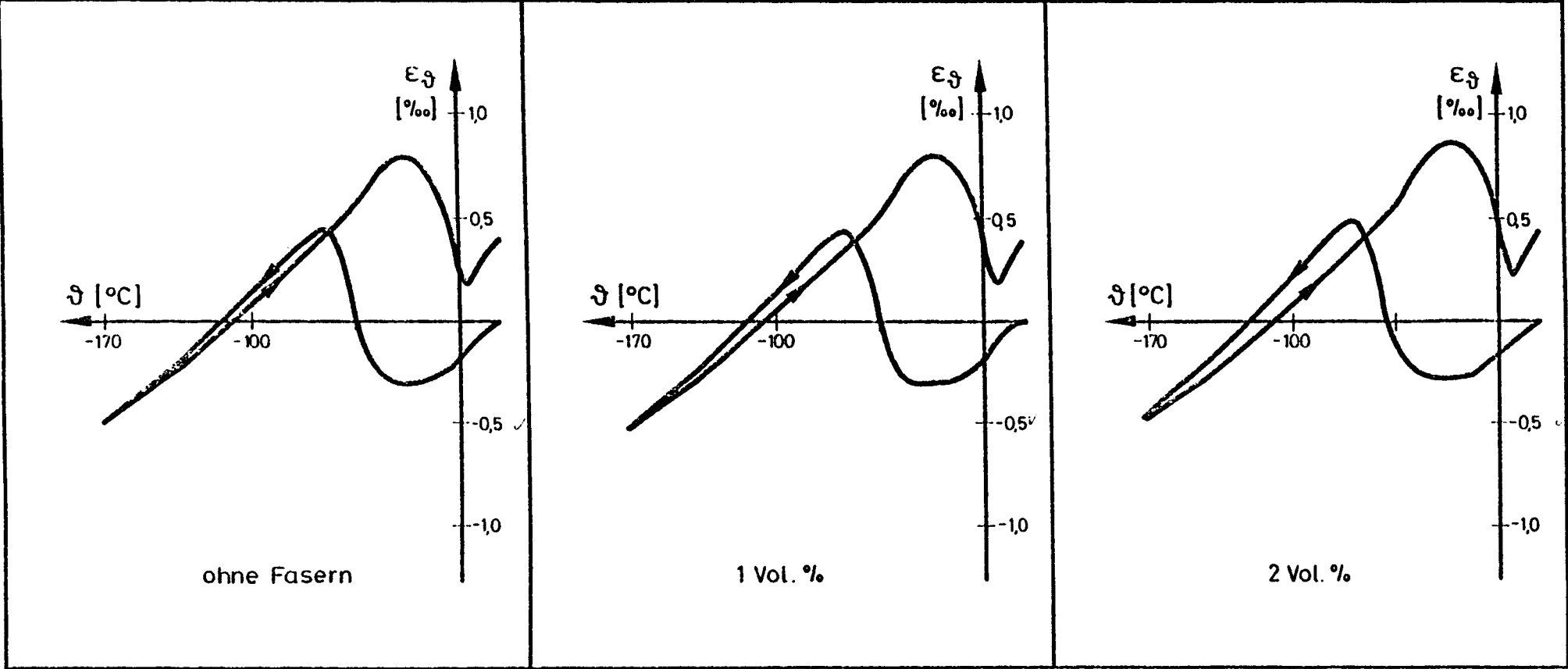


Bild 6.3: Thermisches Dehnverhalten von mit WIREX 0,4/12-Fasern armiertem HOZ-Beton

Beton PZ

1: 5,3 : 0,54

wassersatt

Wirex

0,4 / 25

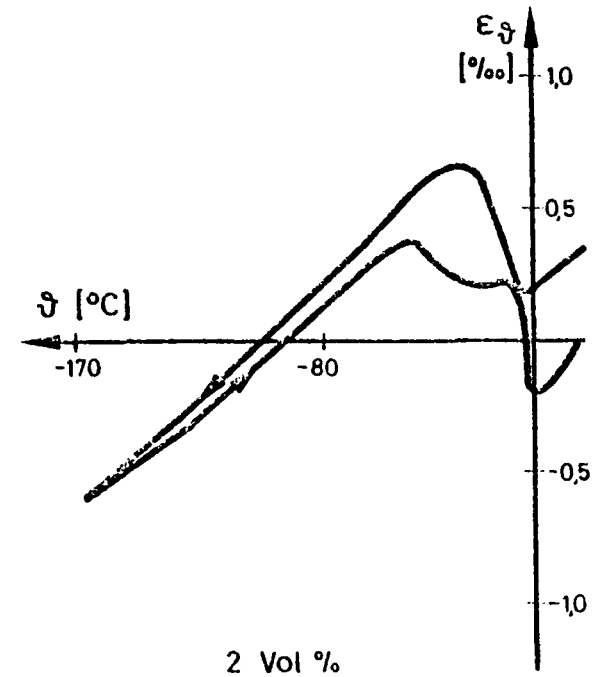
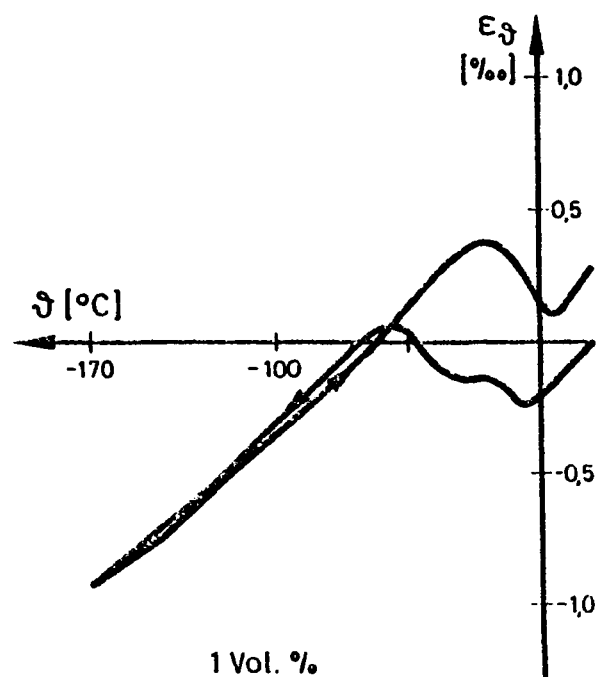
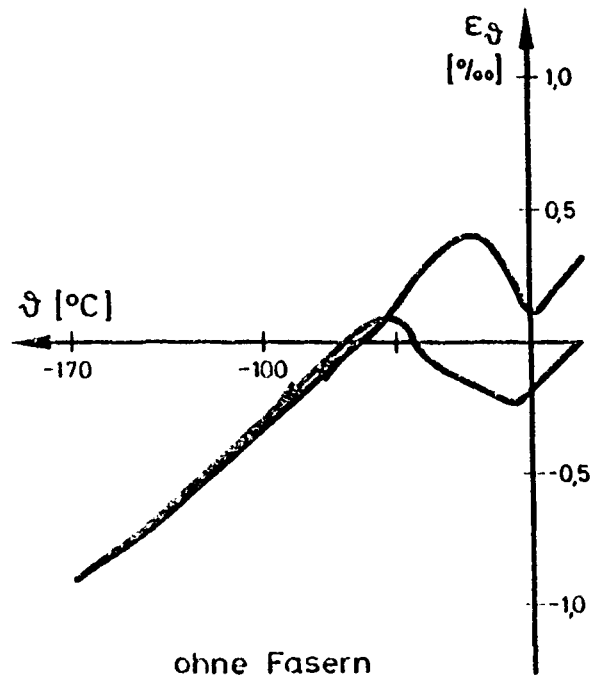


Bild 6.4: Thermisches Dehnverhalten von mit WIREX 0,4/25-Fasern armiertem PZ-Beton

Beton HOZ

1:5,3:0,54

wassersatt

Wirex 0,4/25

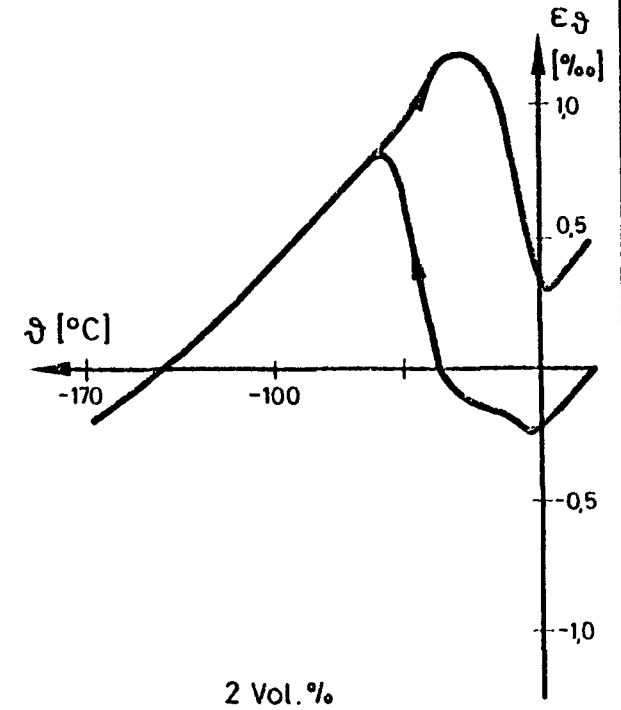
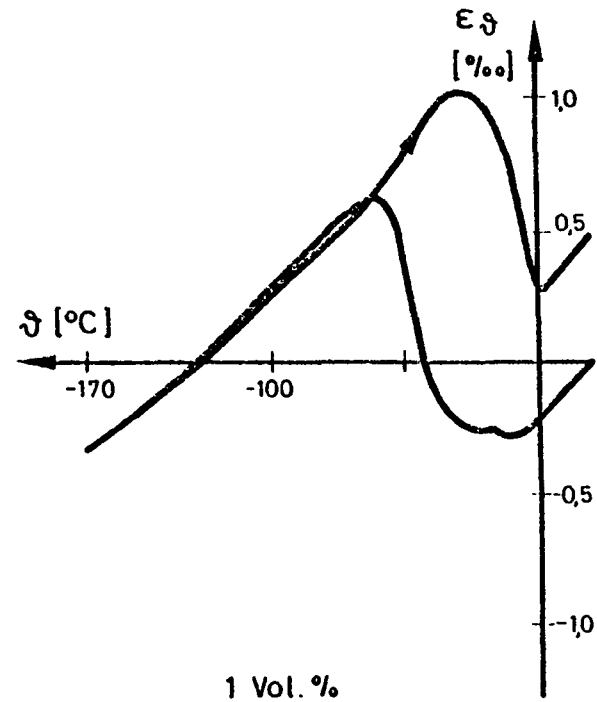
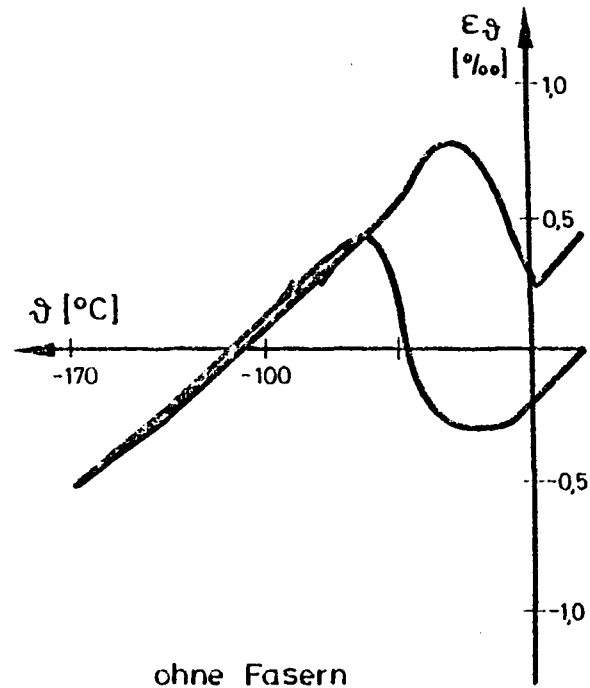


Bild 6.5: Thermisches Dehnverhalten von mit WIREX 0,4/25-Fasern armiertem HOZ-Beton

Beton PZ

1: 5,3 : 0,54

wassersatt

Dramix

OL 30 / 0,50

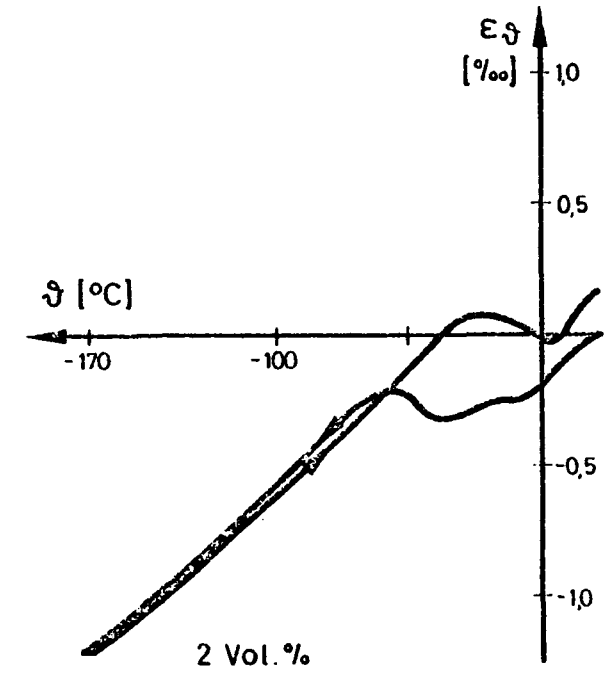
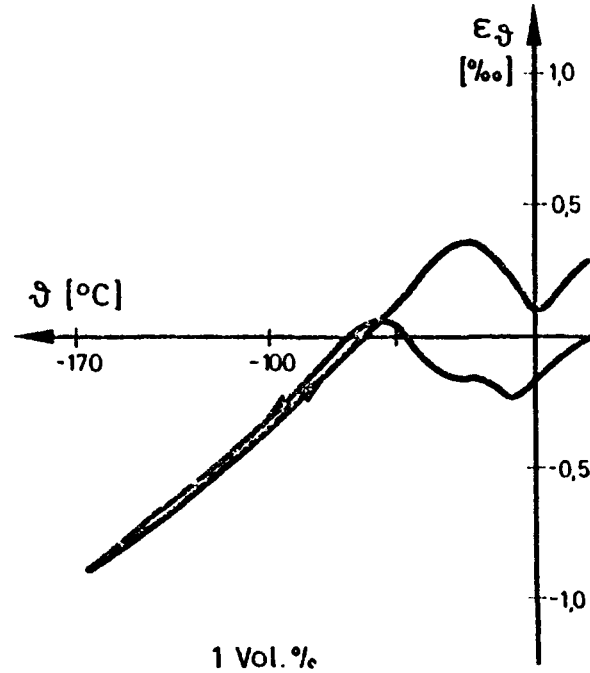
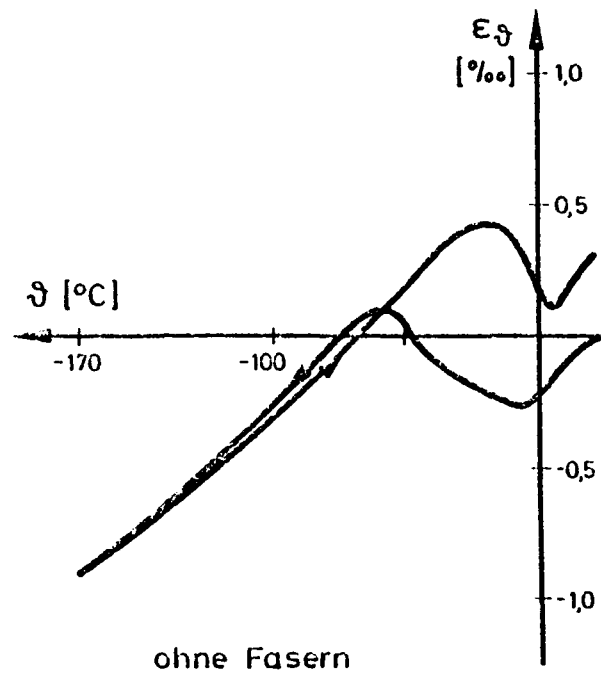


Bild 6.6: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX OL 30/0,50-Fasern armiertem PZ-Beton

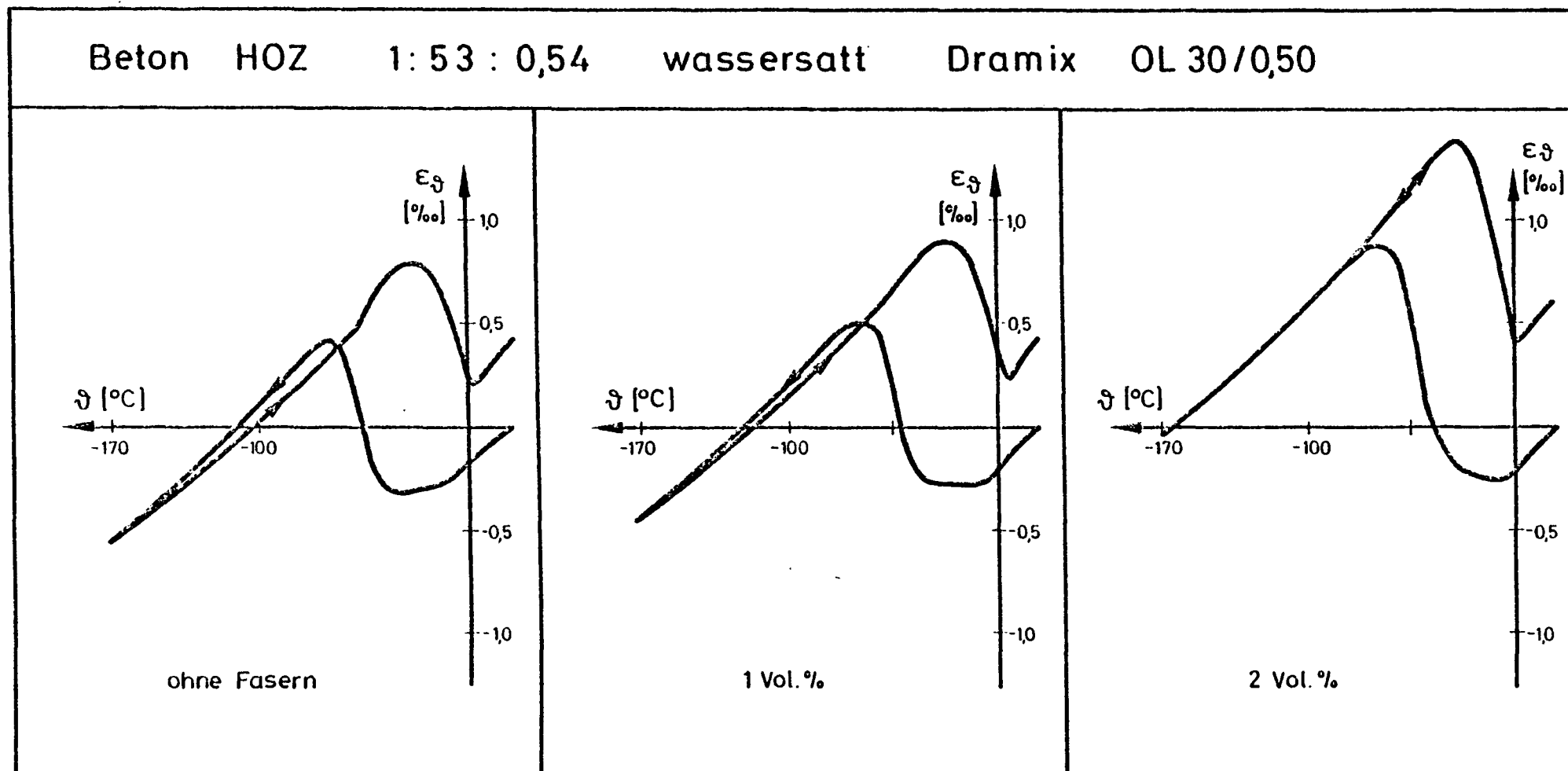


Bild 6.7: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX OL 30/0,50-Fasern armiertem HOZ-Beton

Beton PZ 1:5,3:0,54 wassersatt Dramix ZP 30/0,50

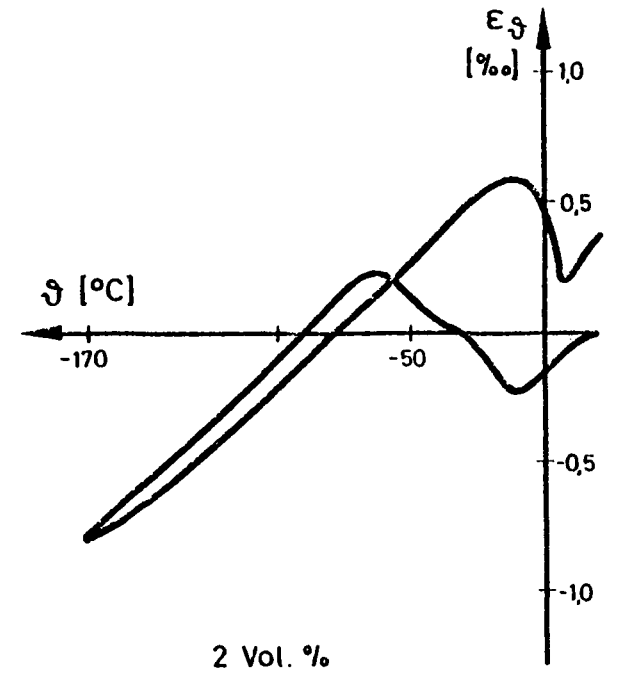
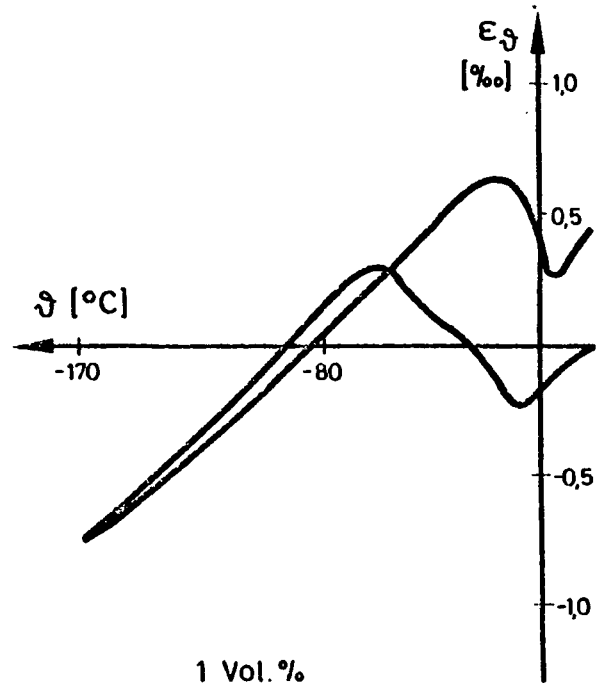
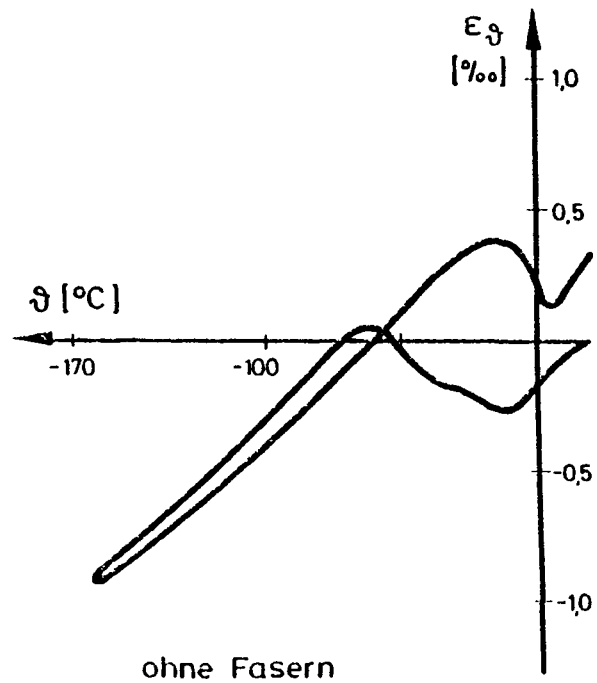


Bild 6.8: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX ZP 30/0,50-Fasern armiertem PZ-Beton

Beton HOZ 1:5,3:0,54 wassersatt Dramix ZP 30/0,50

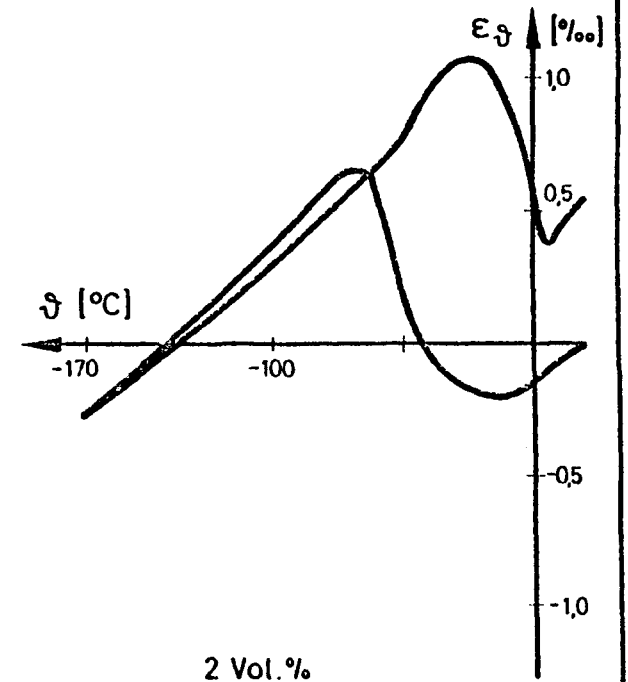
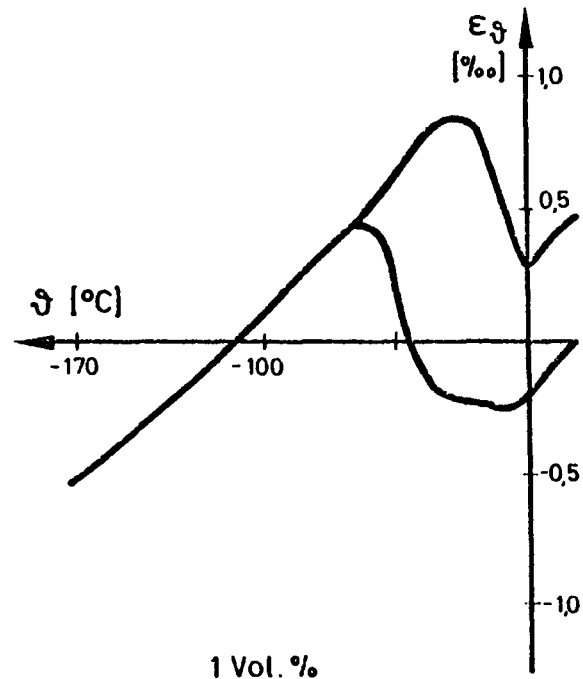
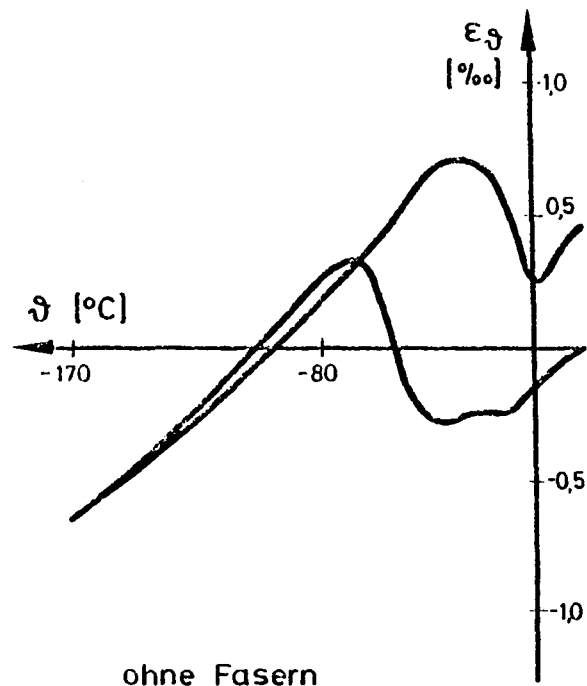


Bild 6.9: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX ZP 30/0,50-Fasern armiertem HOZ-Beton

Beton PZ 1:5,3 : 0,54 wassersatt Dramix ZC 30 / 0,50

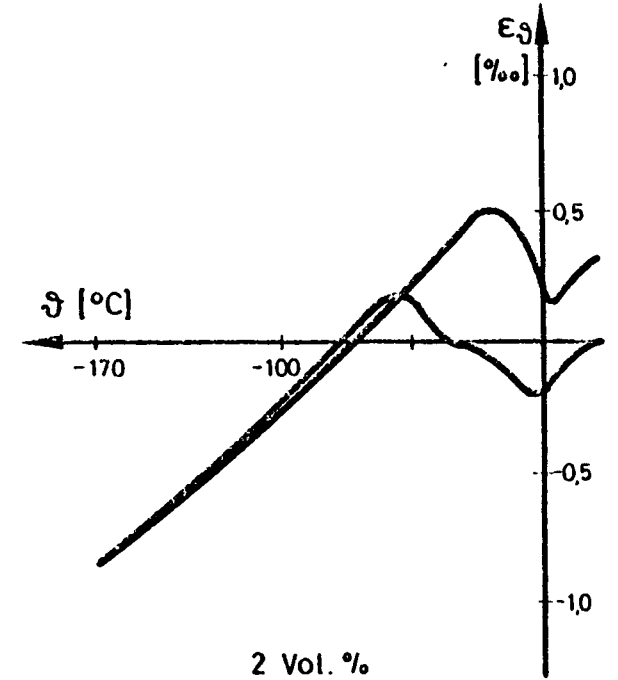
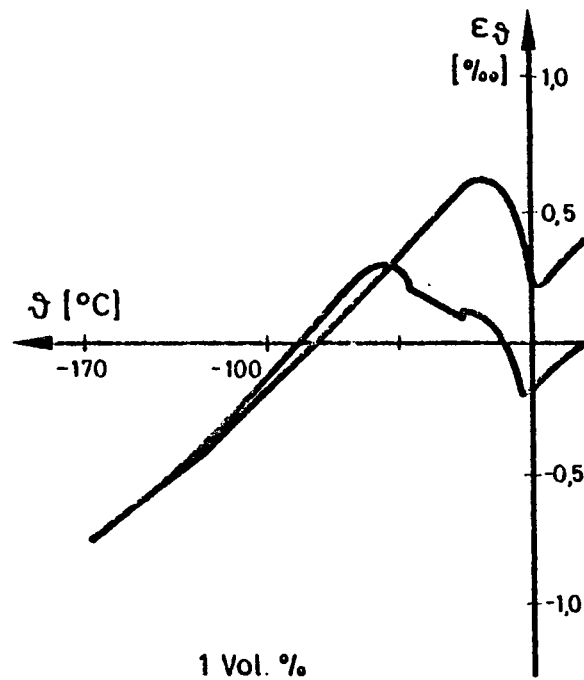
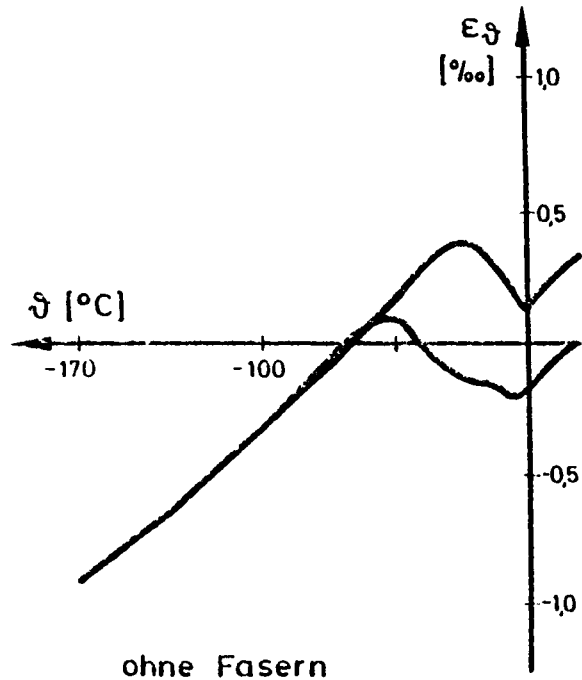


Bild 6.10: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX ZC 30/0,50-Fasern armiertem PZ-Beton

Beton HOZ 1: 5,3 : 0,54 wassersatt Dramix ZC 30/0,50 \downarrow

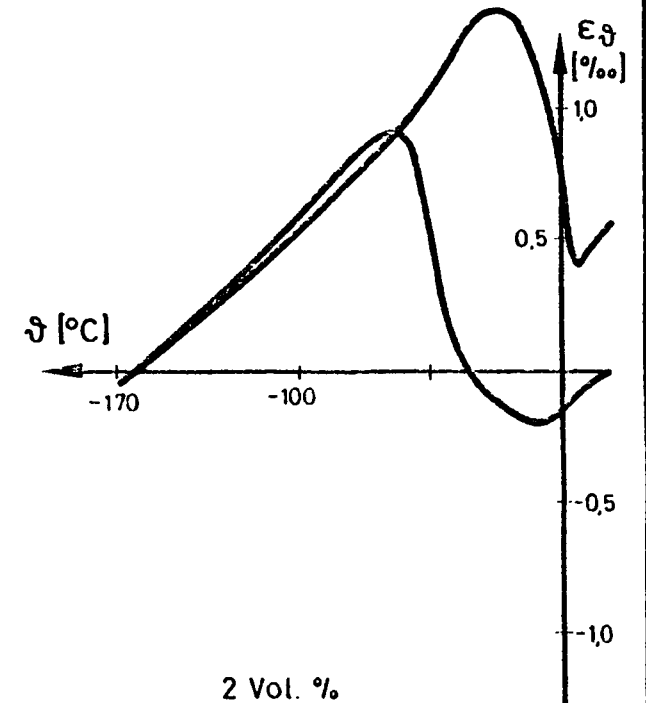
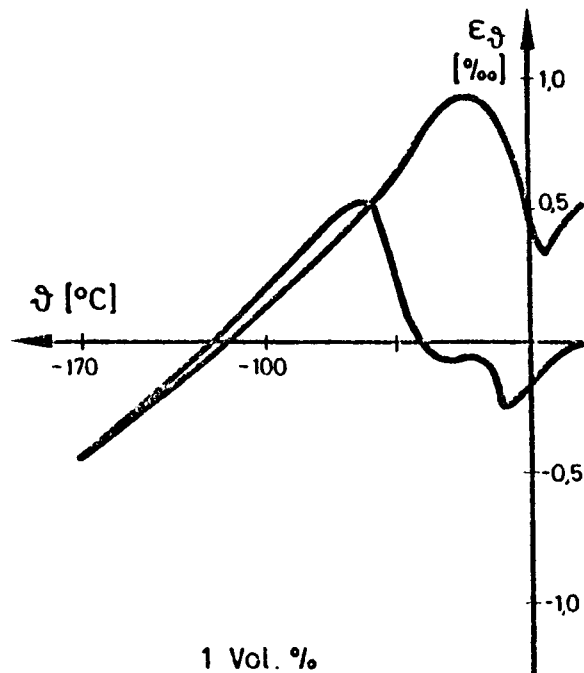
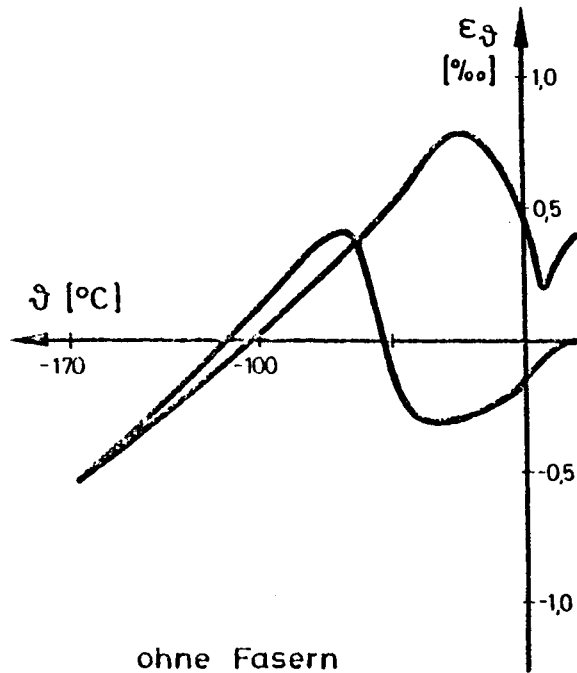


Bild 6.11: Thermisches Dehnverhalten von mit DRAMIX ZC 30/0,50-Fasern armiertem HOZ-Beton

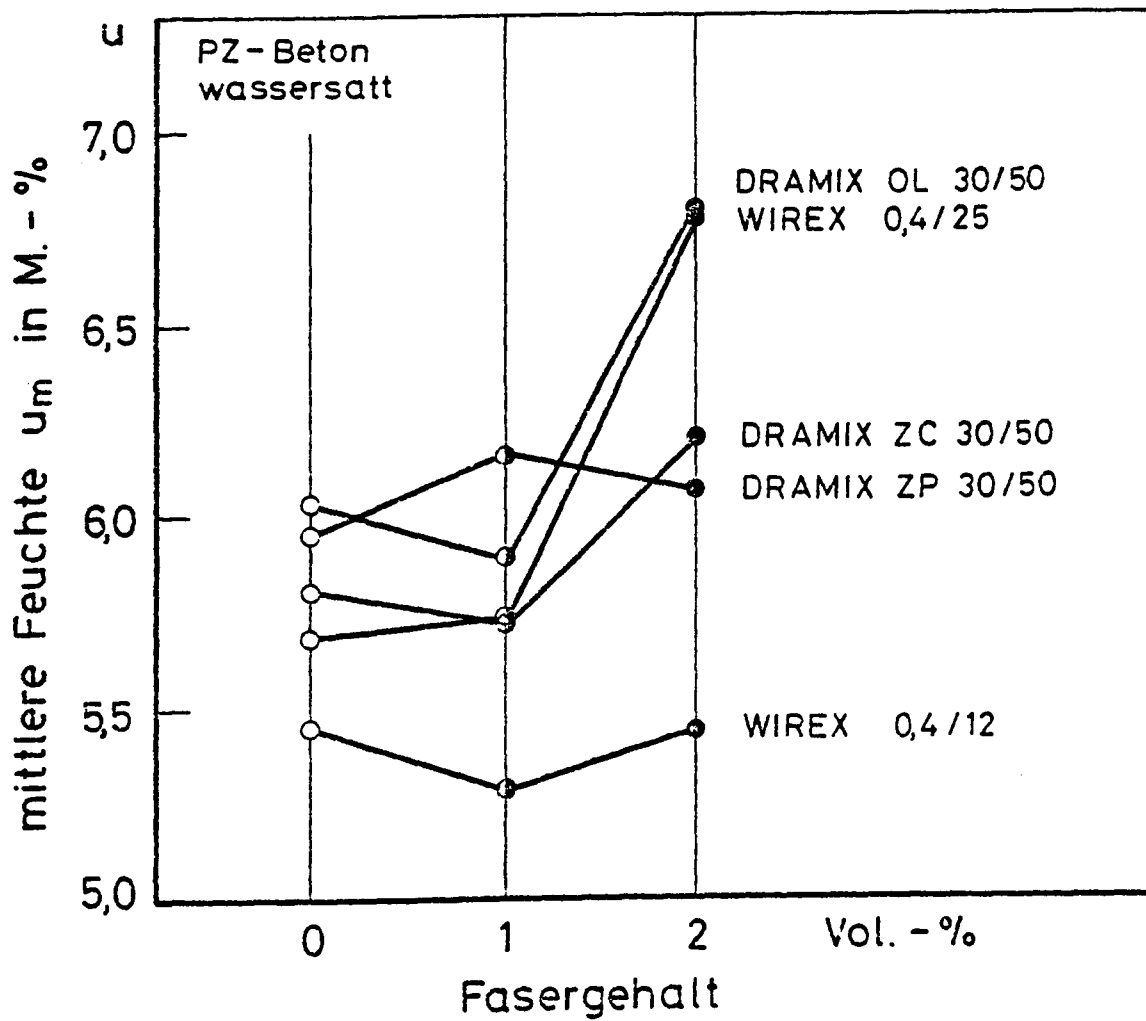


Bild 6.12

Abhängigkeit der mittleren Feuchte vom Fasergehalt bei PZ-Beton

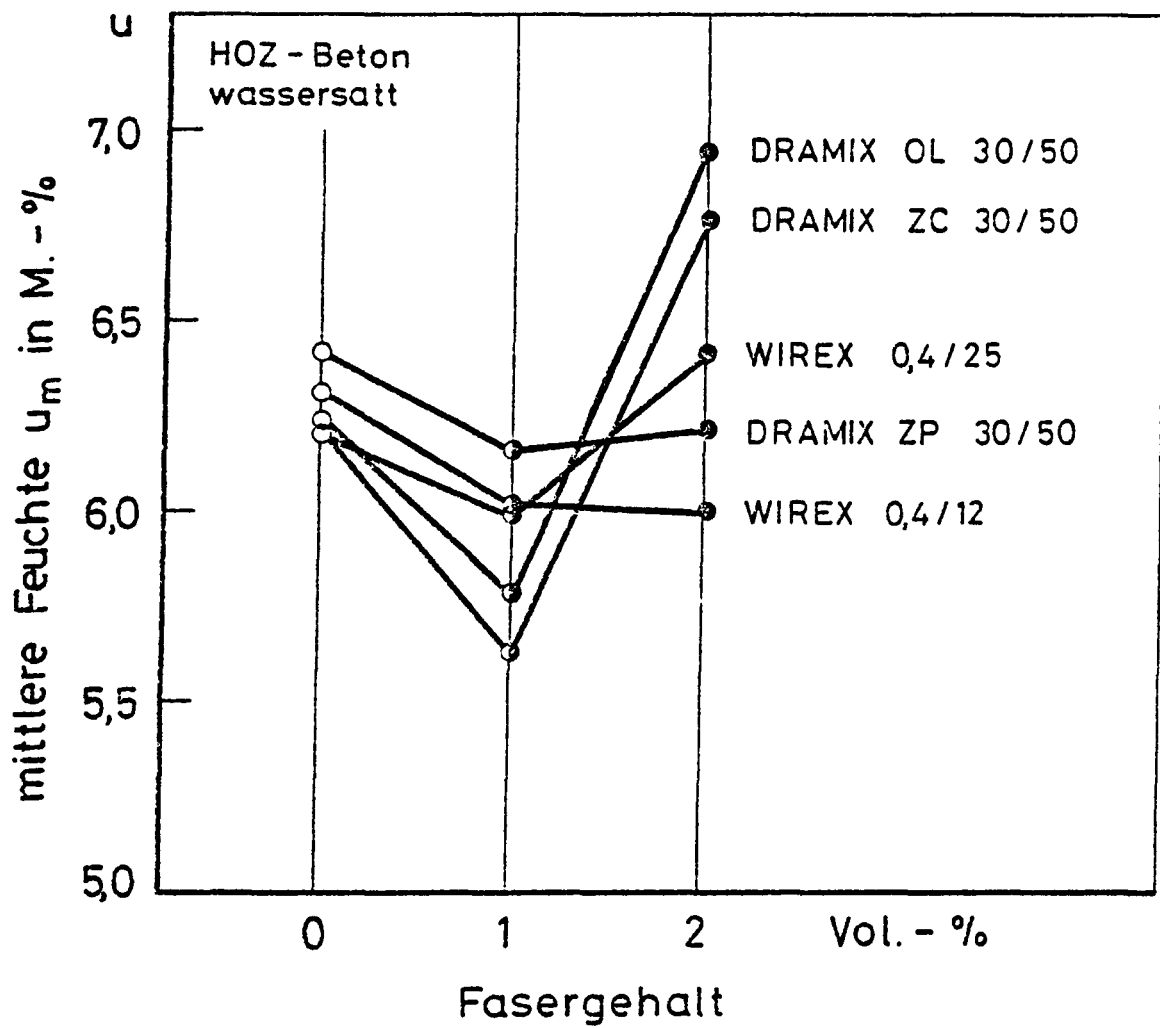


Bild 6.13

Abhängigkeit der mittleren Feuchte vom Faser-
gehalt bei HOZ - Beton

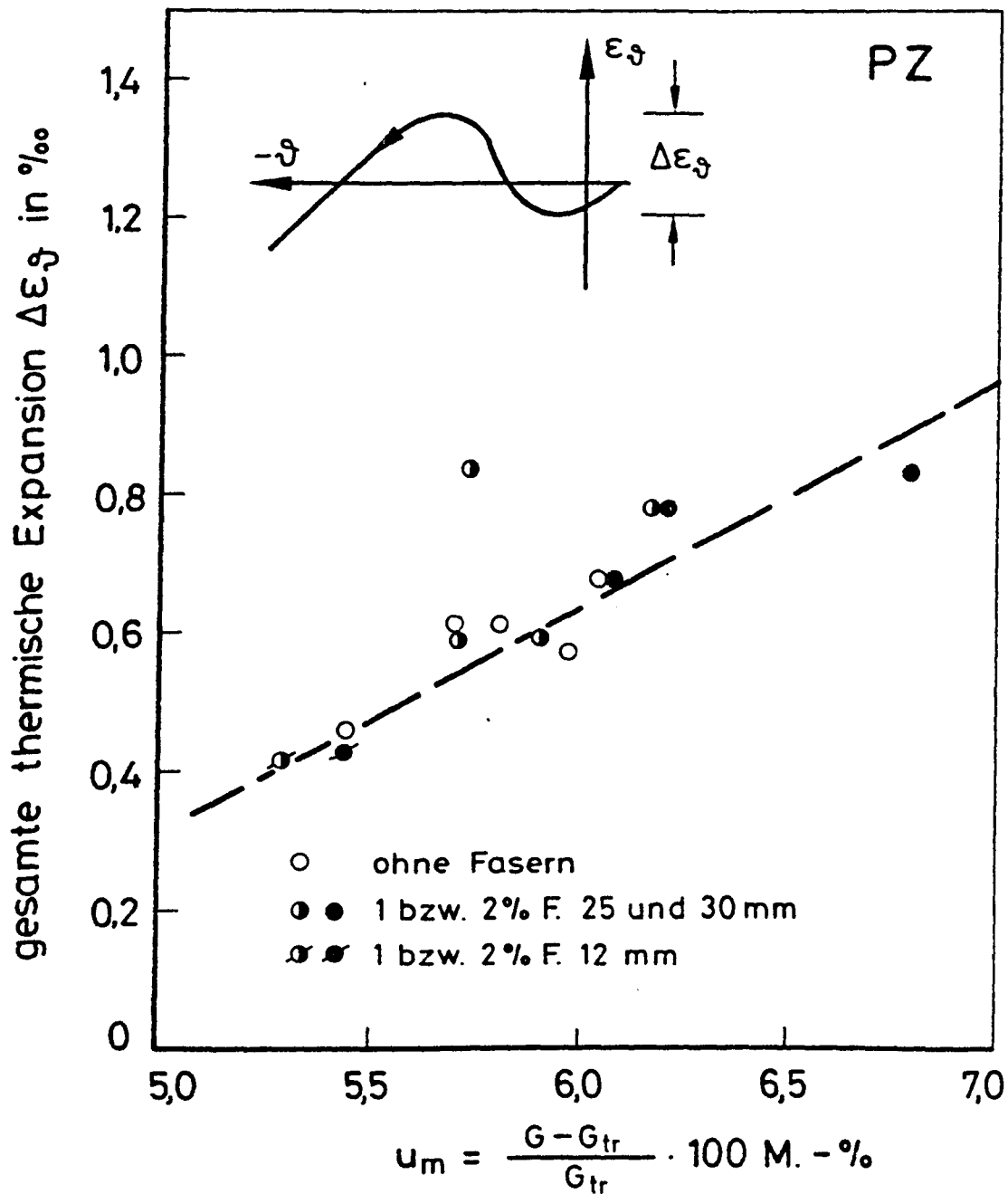


Bild 6.14

Zusammenhang zwischen thermischer Expansion und Feuchtegehalt bei PZ-Beton mit und ohne Stahlfasern

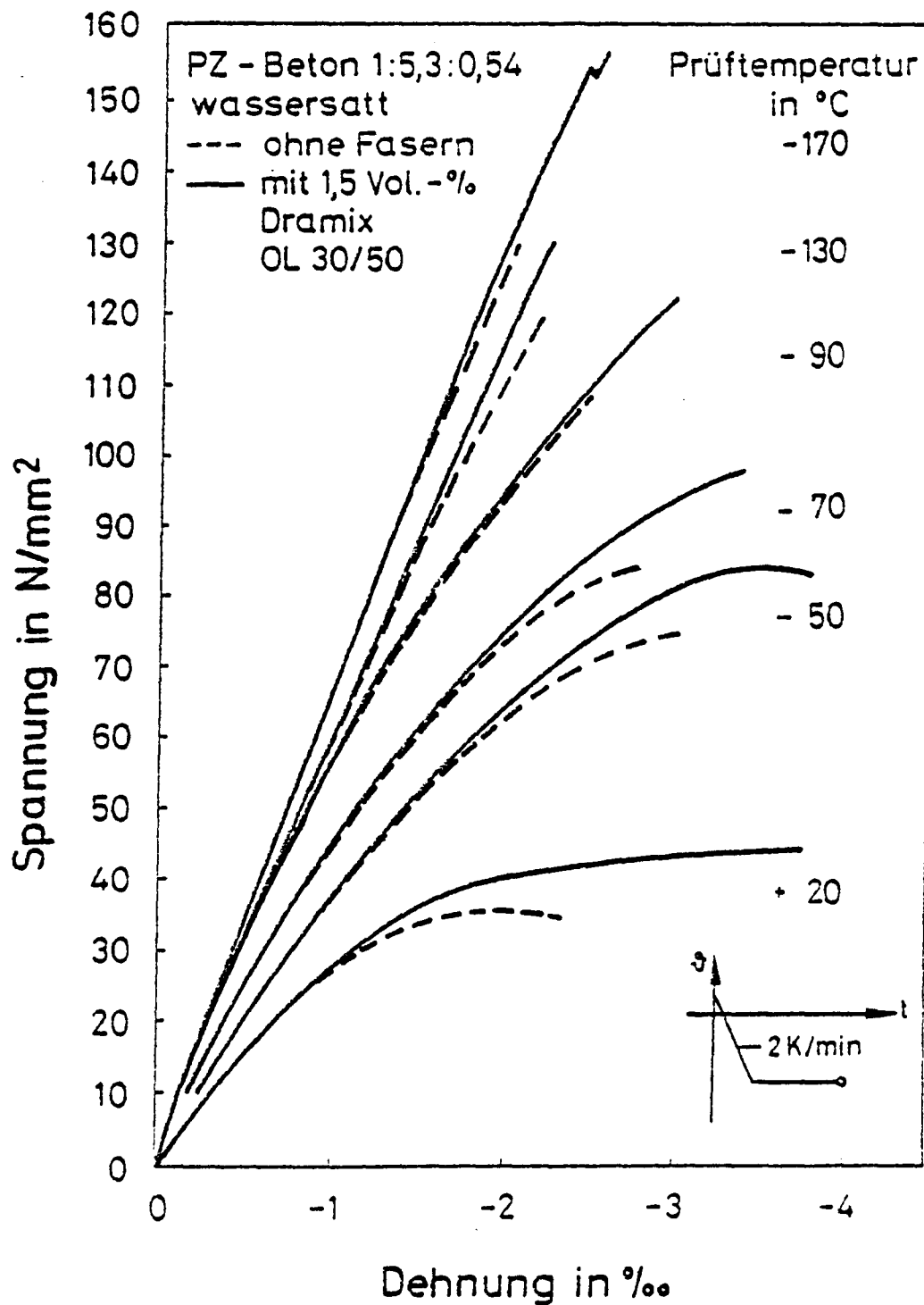


Bild 6.16

Spannungs-Dehnungs-Linien von Beton mit und ohne Stahlfasern bei verschiedenen Tieftemperaturen.

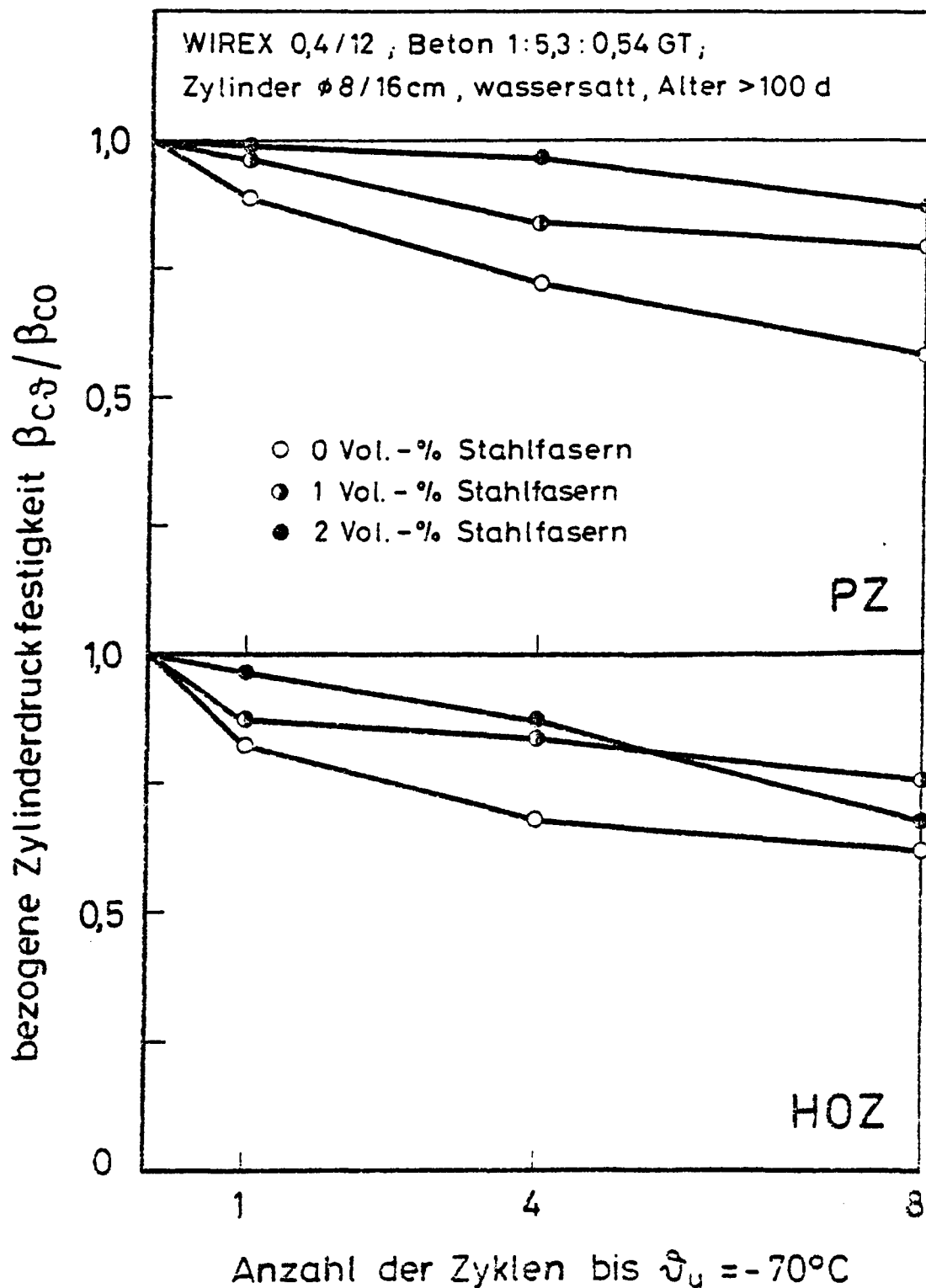


Bild 6.17

Abfall der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit infolge von TT-Zyklen bei Armierung mit WIREX 0,4/12-Stahlfasern

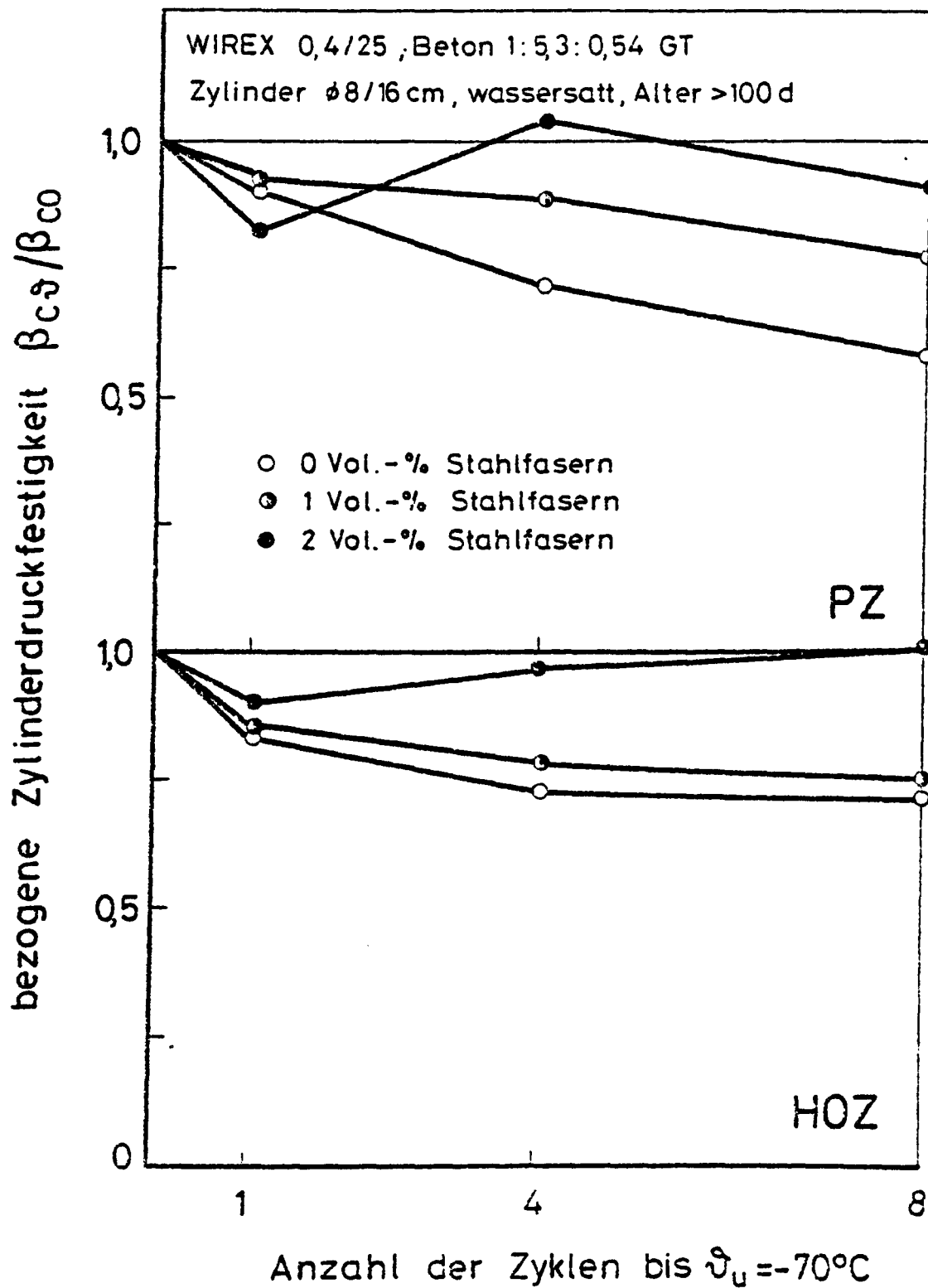


Bild 6.18

Abfall der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit infolge von TT-Zyklen bei Armierung mit WIREX 04/25-Stahlfasern

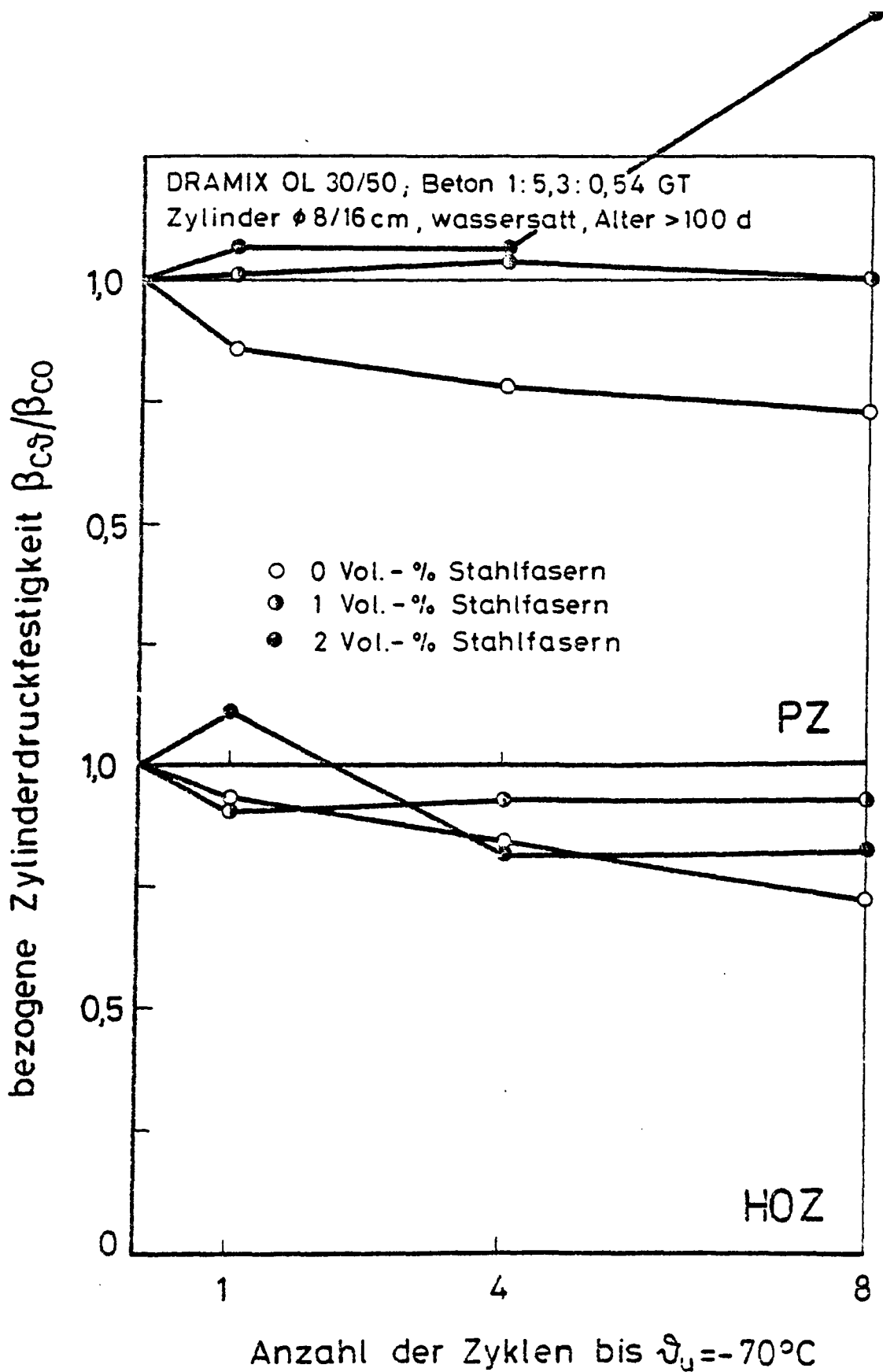


Bild 6.19

Abfall der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit infolge von TT-Zyklen bei Armierung mit DRAMIX OL 30/50-Stahlfasern

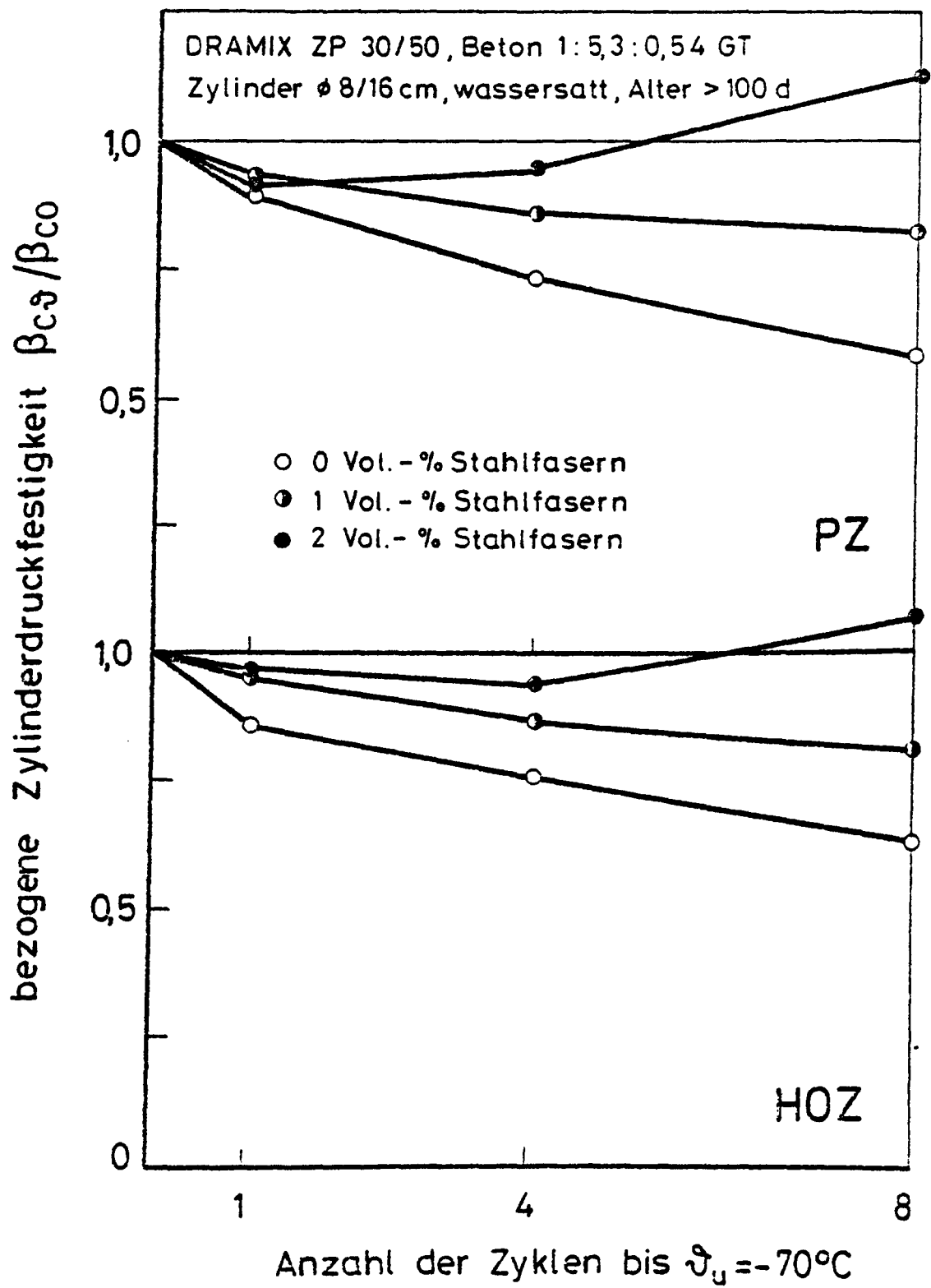


Bild 6.20

Abfall der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit infolge von TT-Zyklen bei Armierung mit DRAMIX ZP 30/50-Stahlfasern

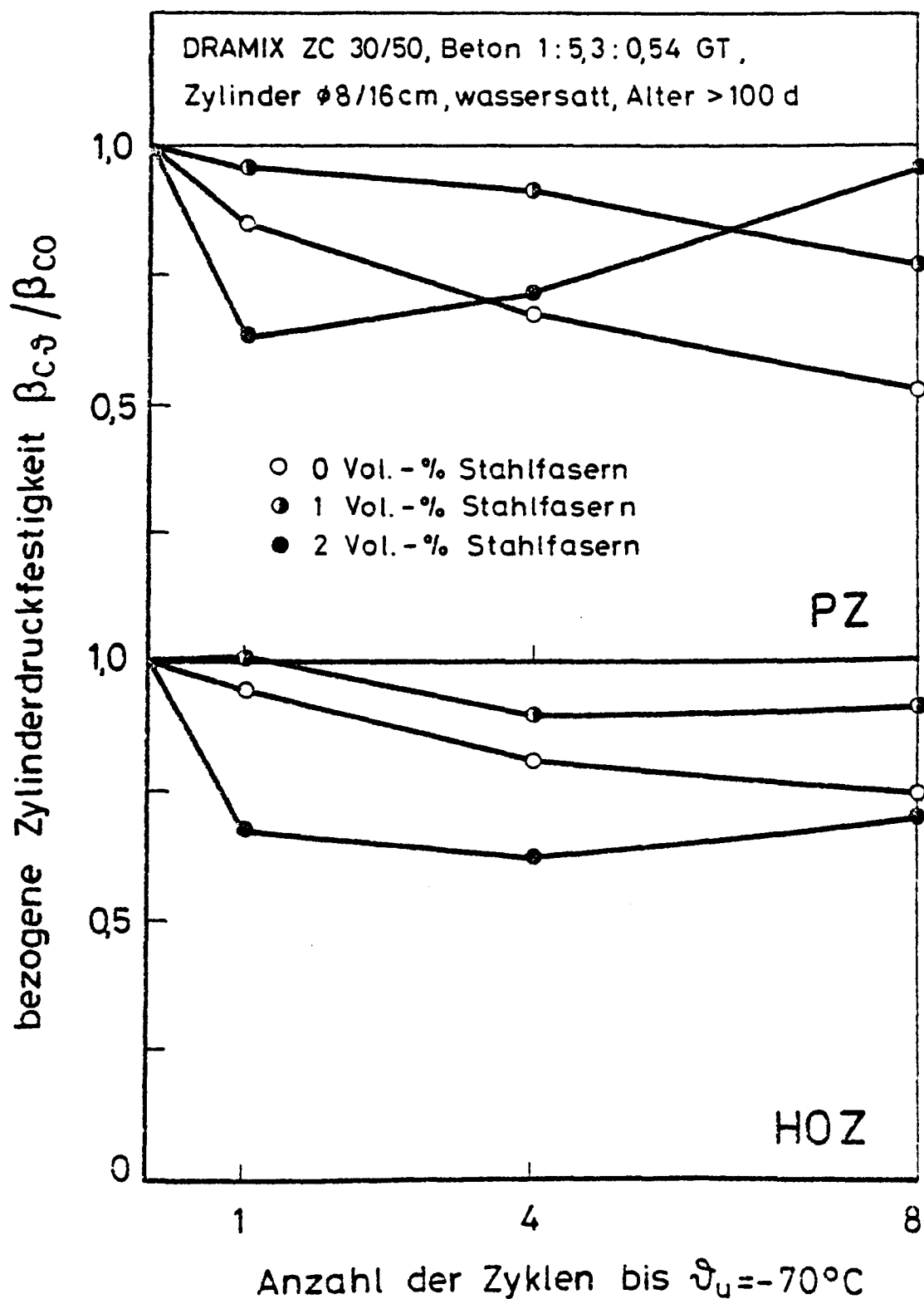


Bild 6.21

Abfall der bezogenen Zylinderdruckfestigkeit infolge von
TT-Zyklen bei Armierung mit DRAMIX ZC 30/50-Stahlfasern

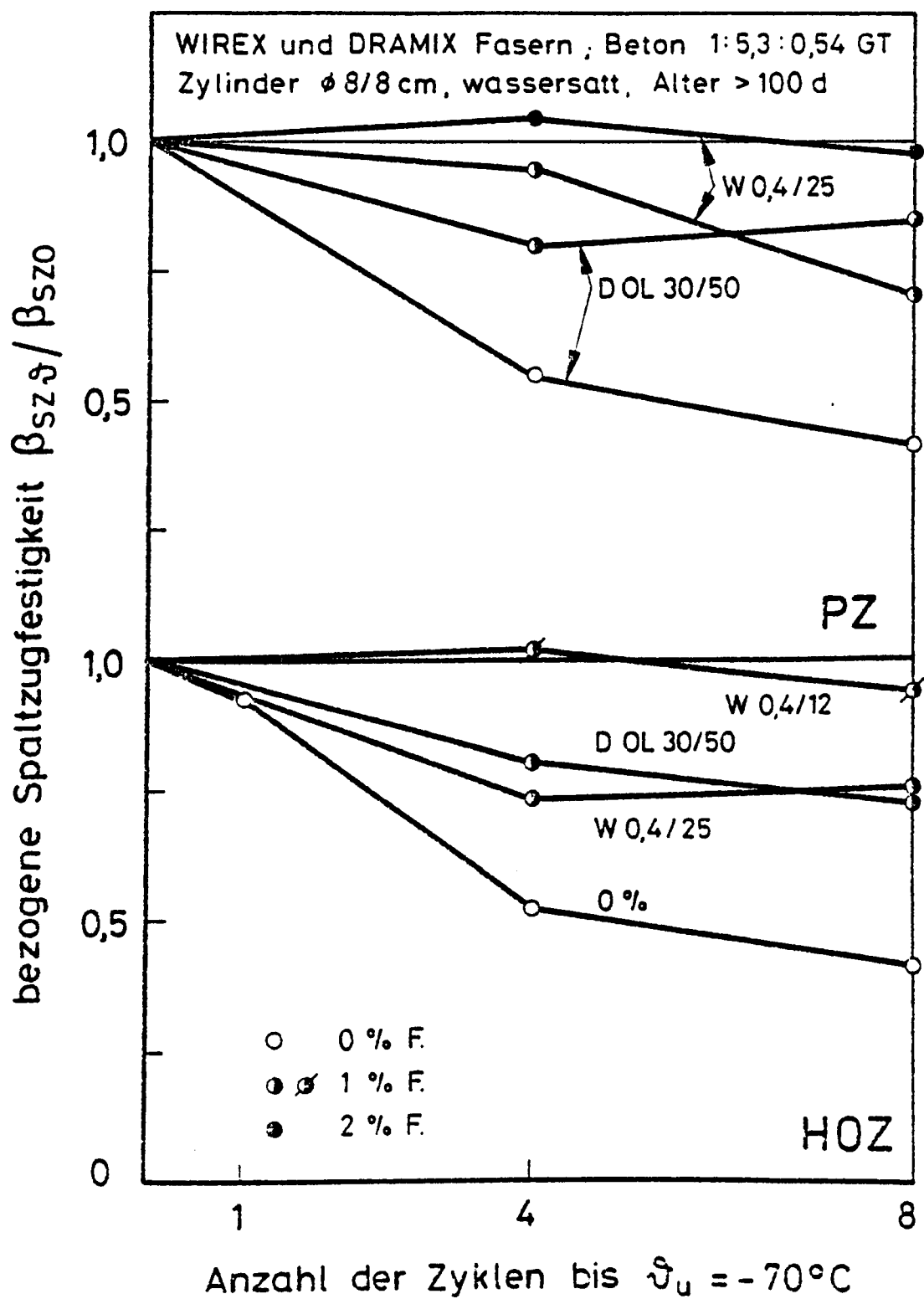


Bild 6.22

Abfall der bezogenen Spaltzugfestigkeit infolge von TT-Zyklen bei Armierung mit Stahlfasern

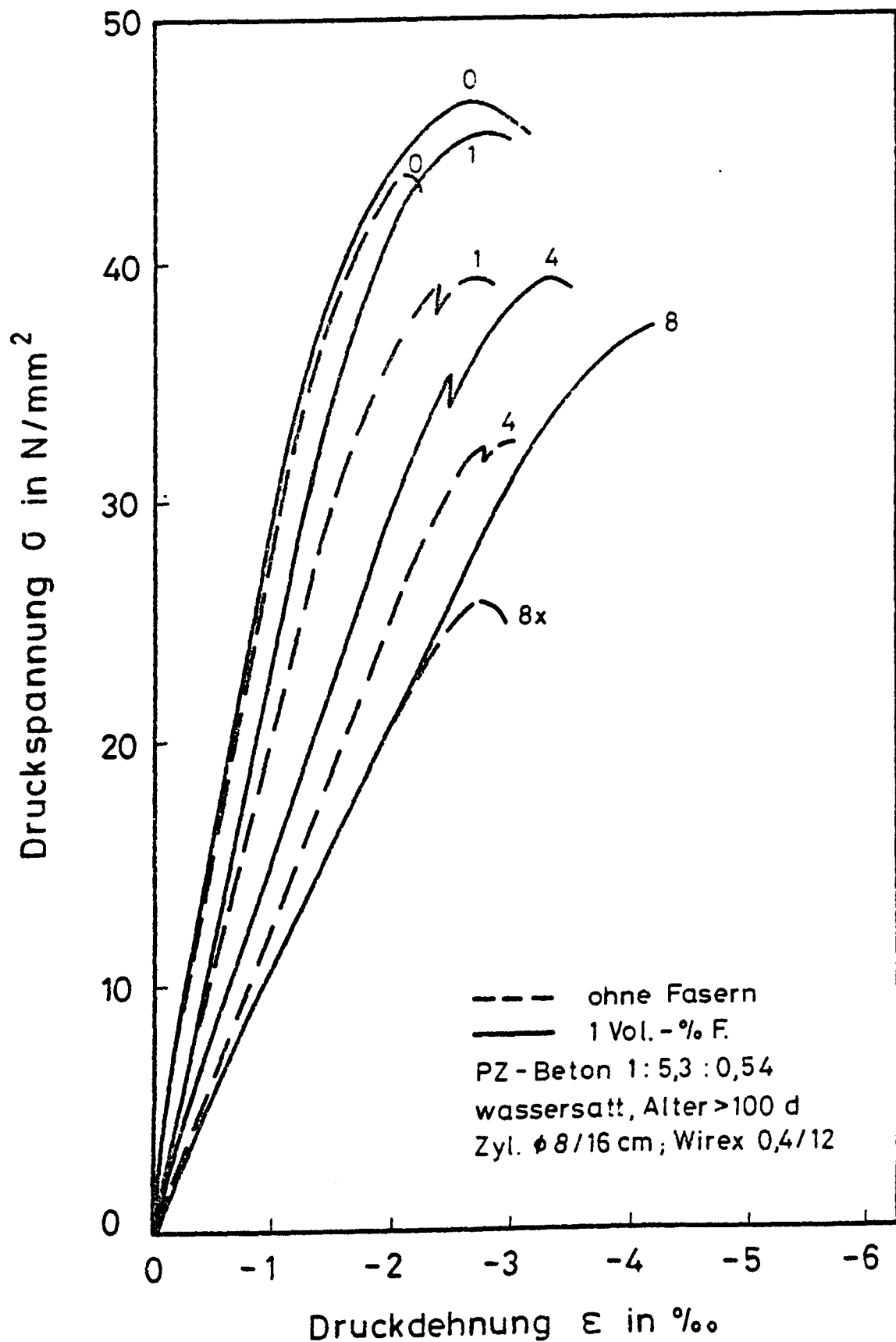


Bild 6.23

Spannungs-Dehnungslinie vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 1 % WIREX 0,4/12

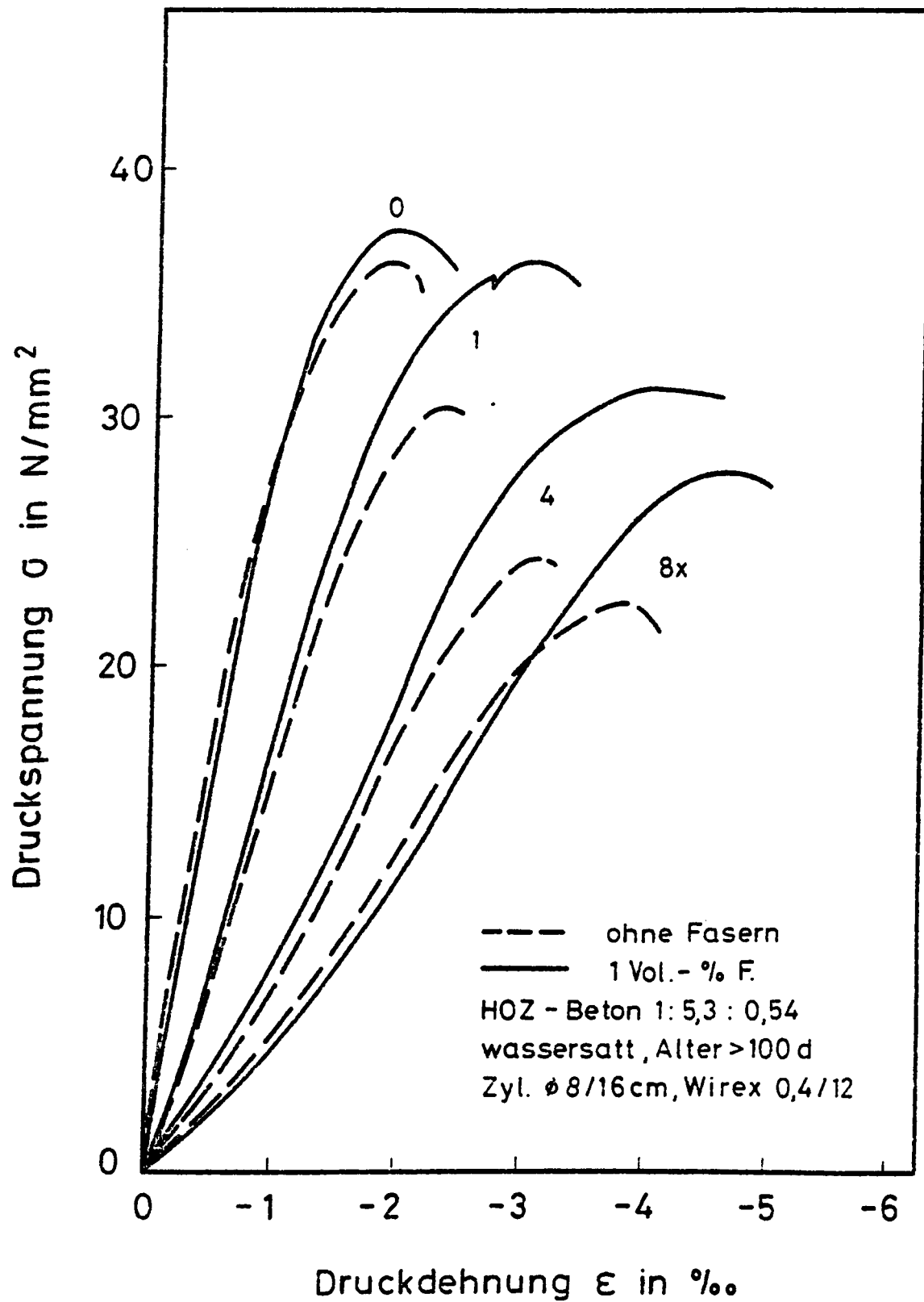


Bild 6.24

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 HOZ-Beton mit 1 % WIREX 0,4/12

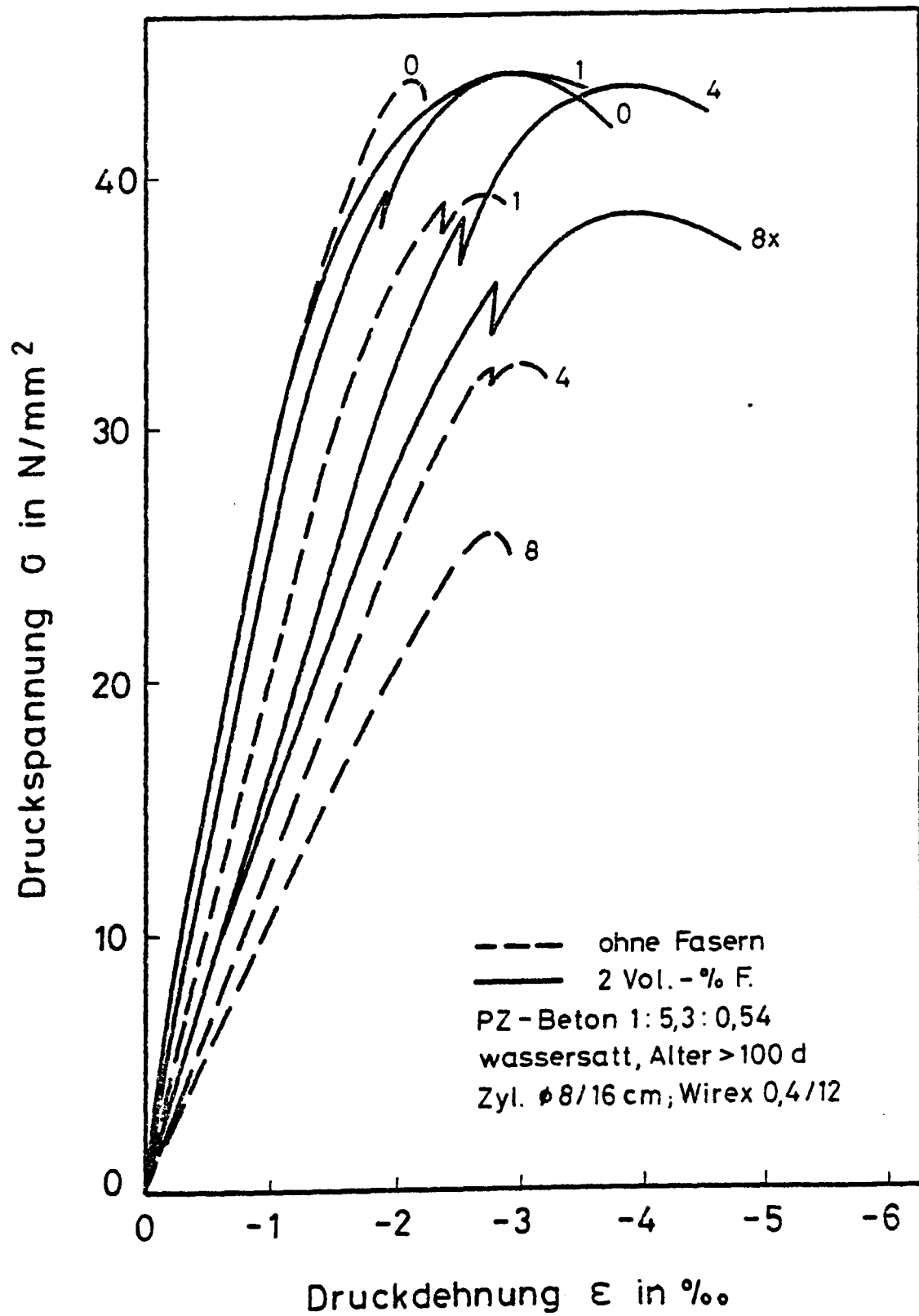


Bild 6.25

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 2 % WIREX 0,4/12

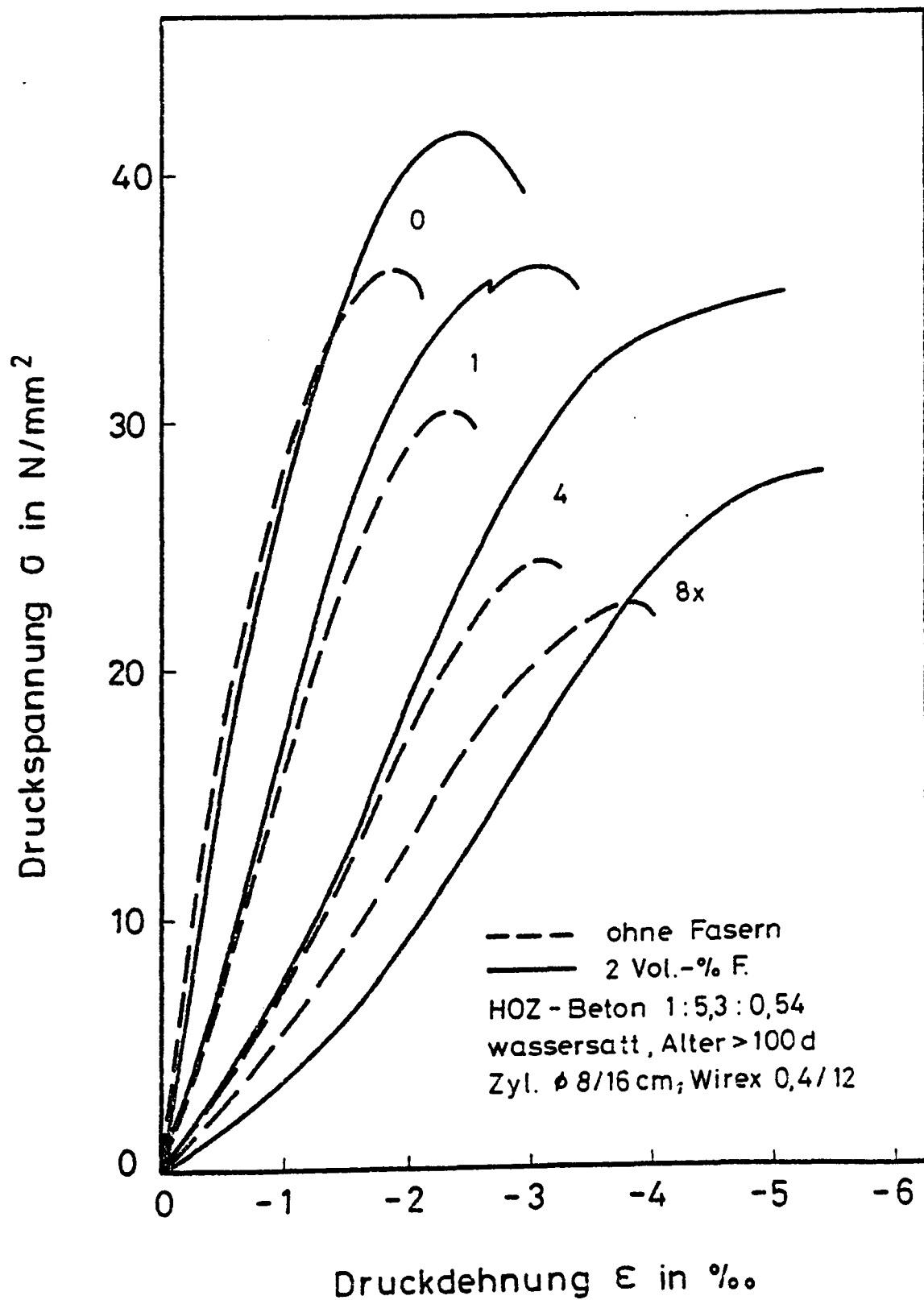


Bild 6.26

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 HOZ-Beton mit 2 % WIREX 0,4/12

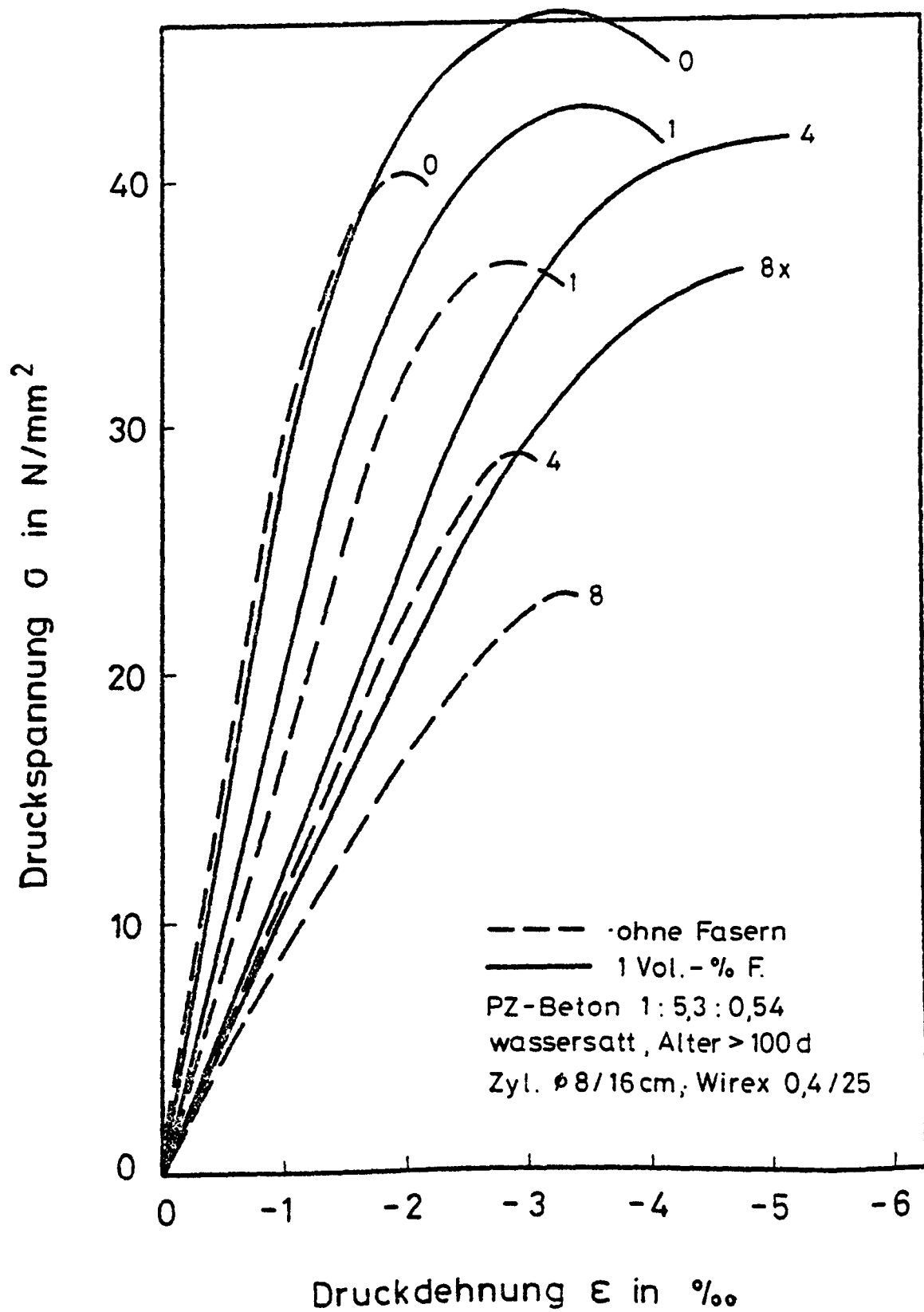


Bild 6.27

Spannungs-Dehnungslinie vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 1 % WIREX 0,4/25

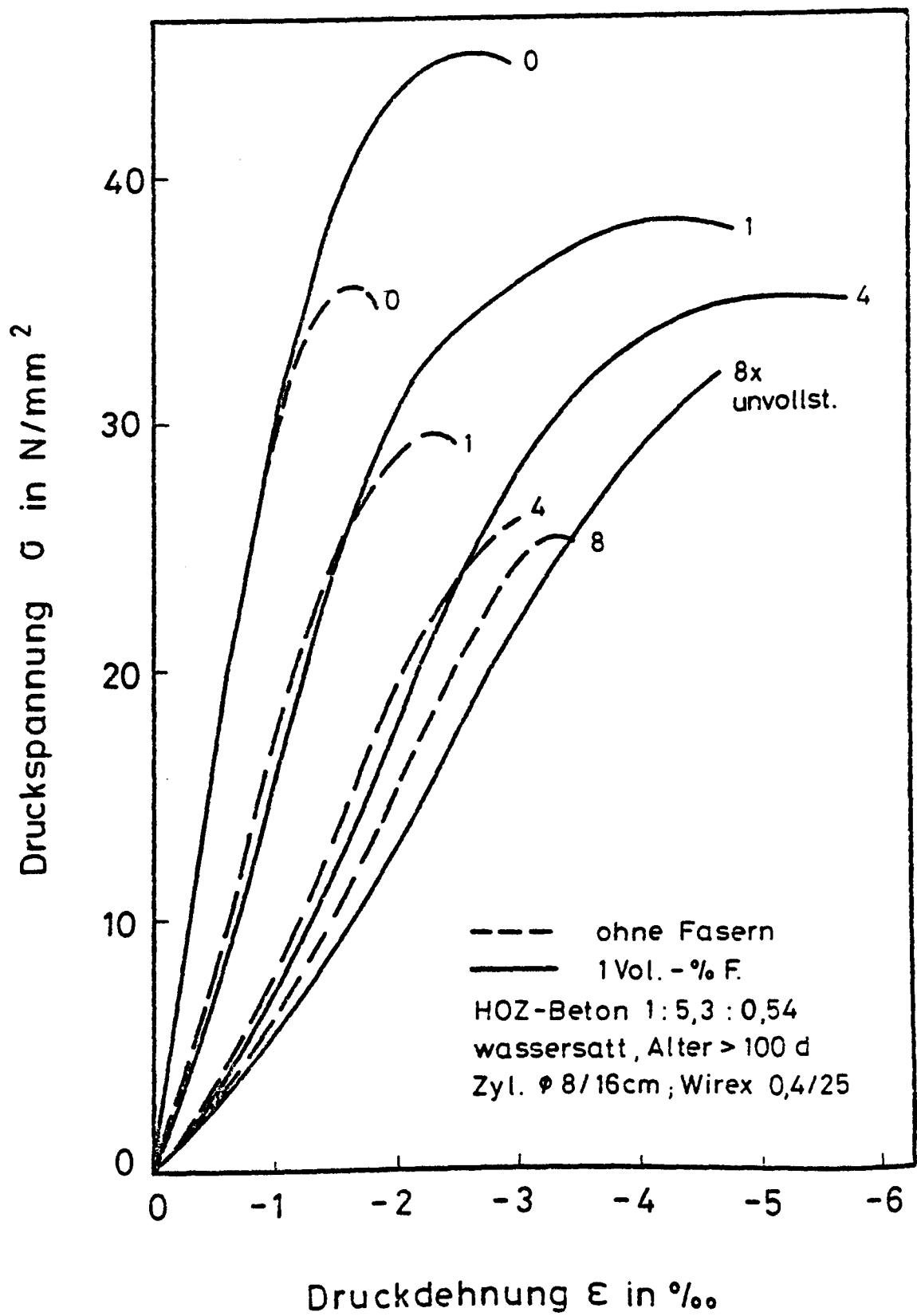


Bild 6.28

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 HOZ-Beton mit 1 % WIREX 0,4/25

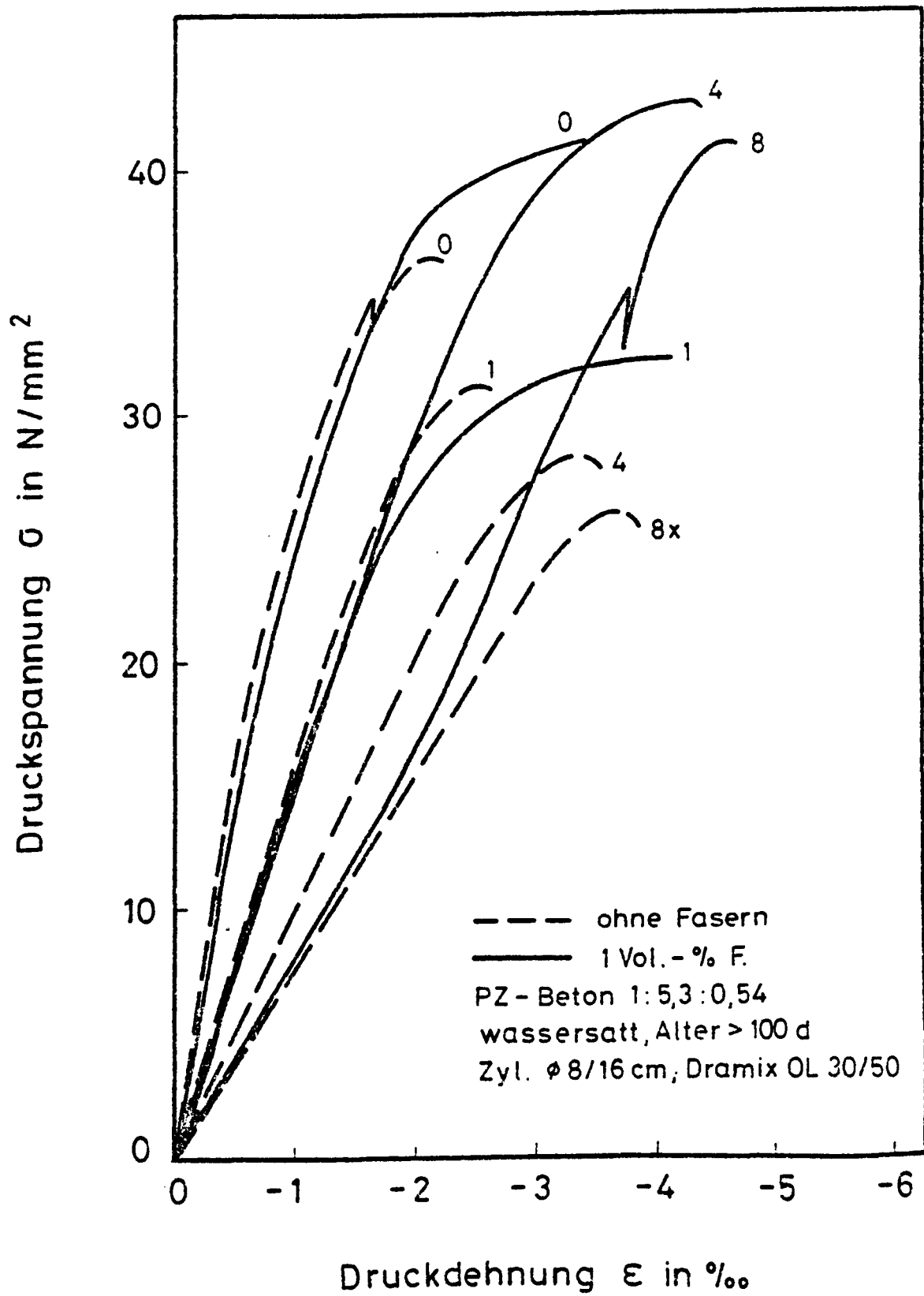


Bild 6.29

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 1 % DRAMIX OL 30/50

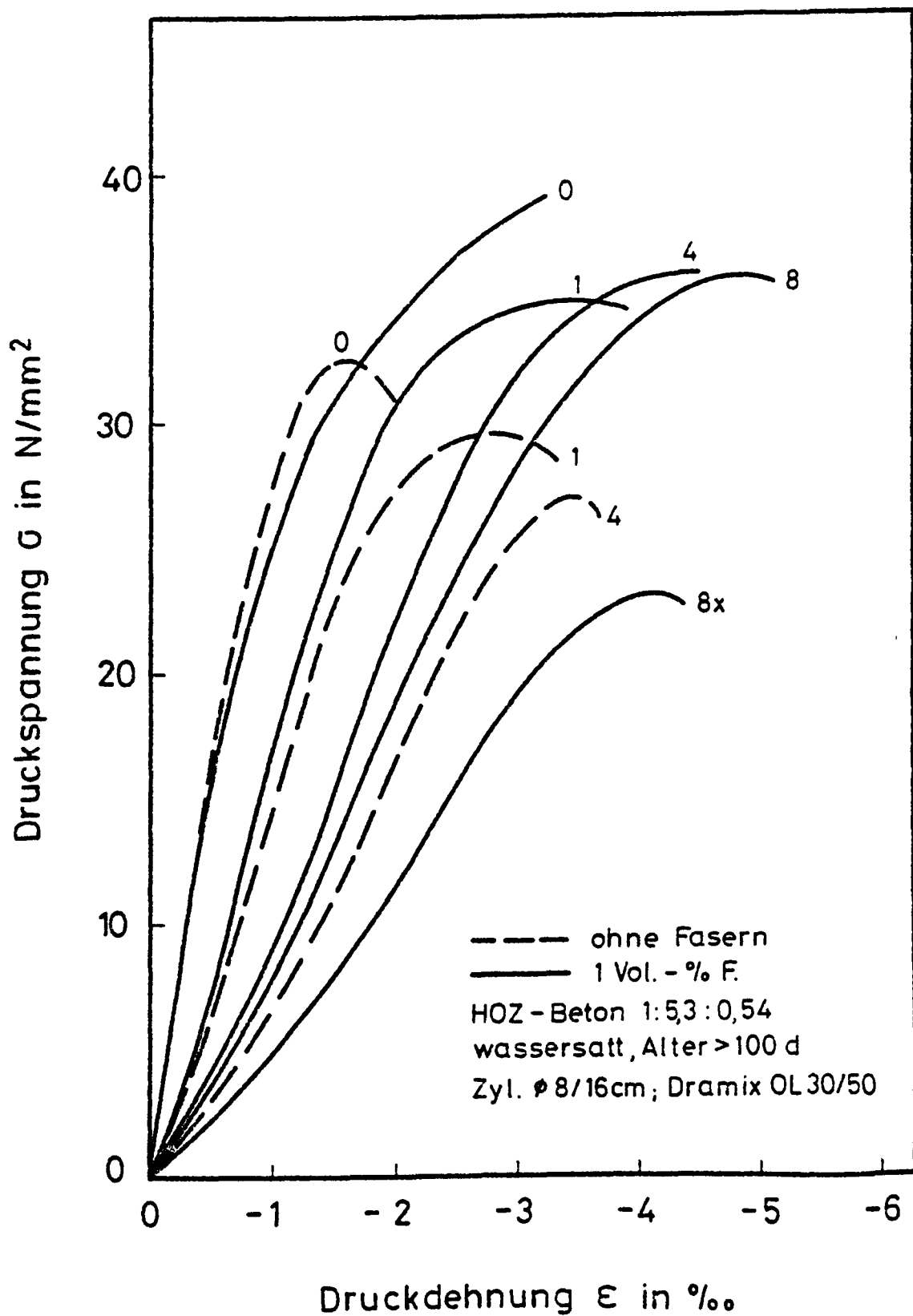


Bild 6.30

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 HOZ-Beton mit 1 % DRAMIX OL 30/50

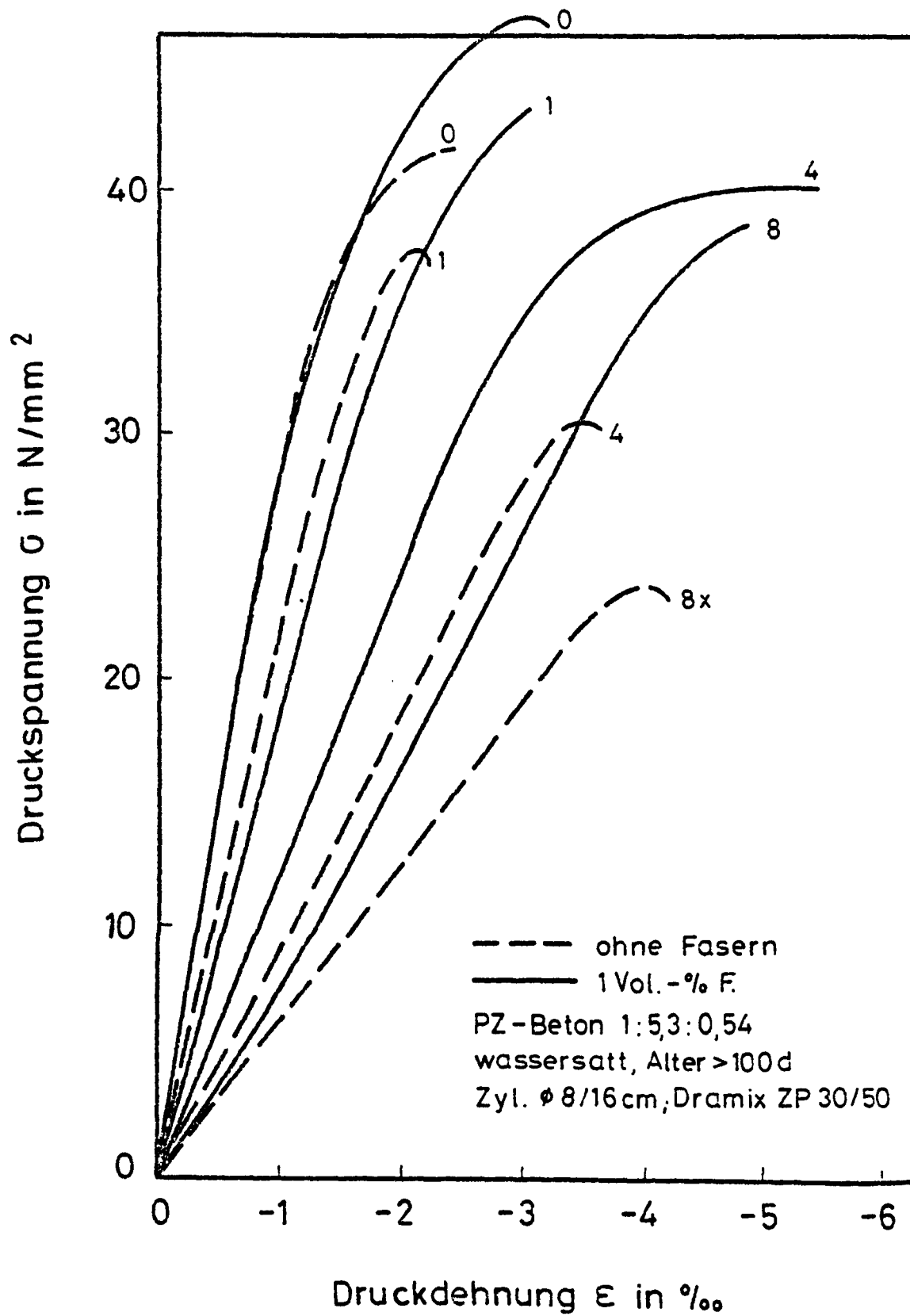


Bild 6.31

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 1 % DRAMIX ZP 30/50

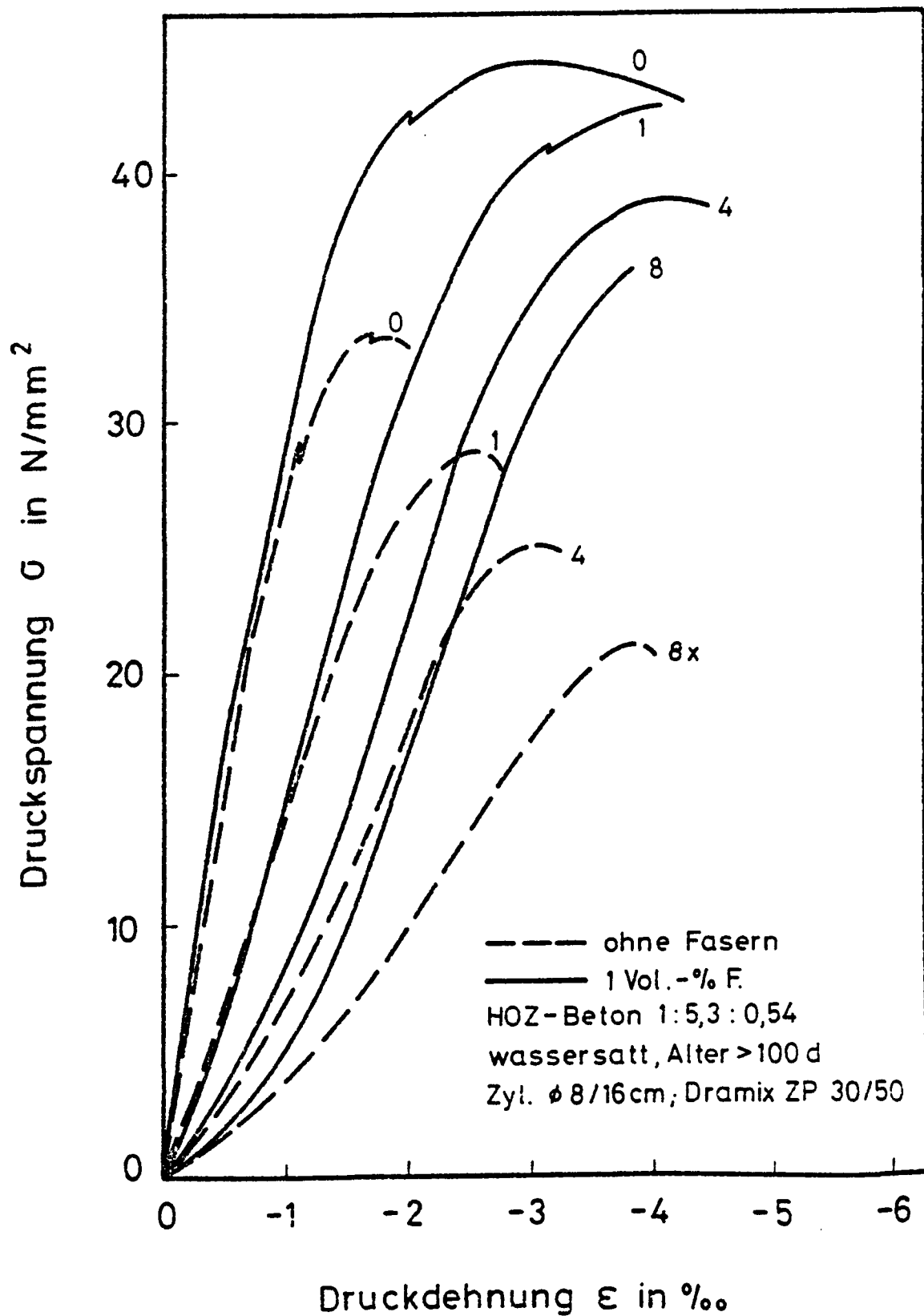


Bild 6.32

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 HOZ-Beton mit 1 % DRAMIX ZP 30/50

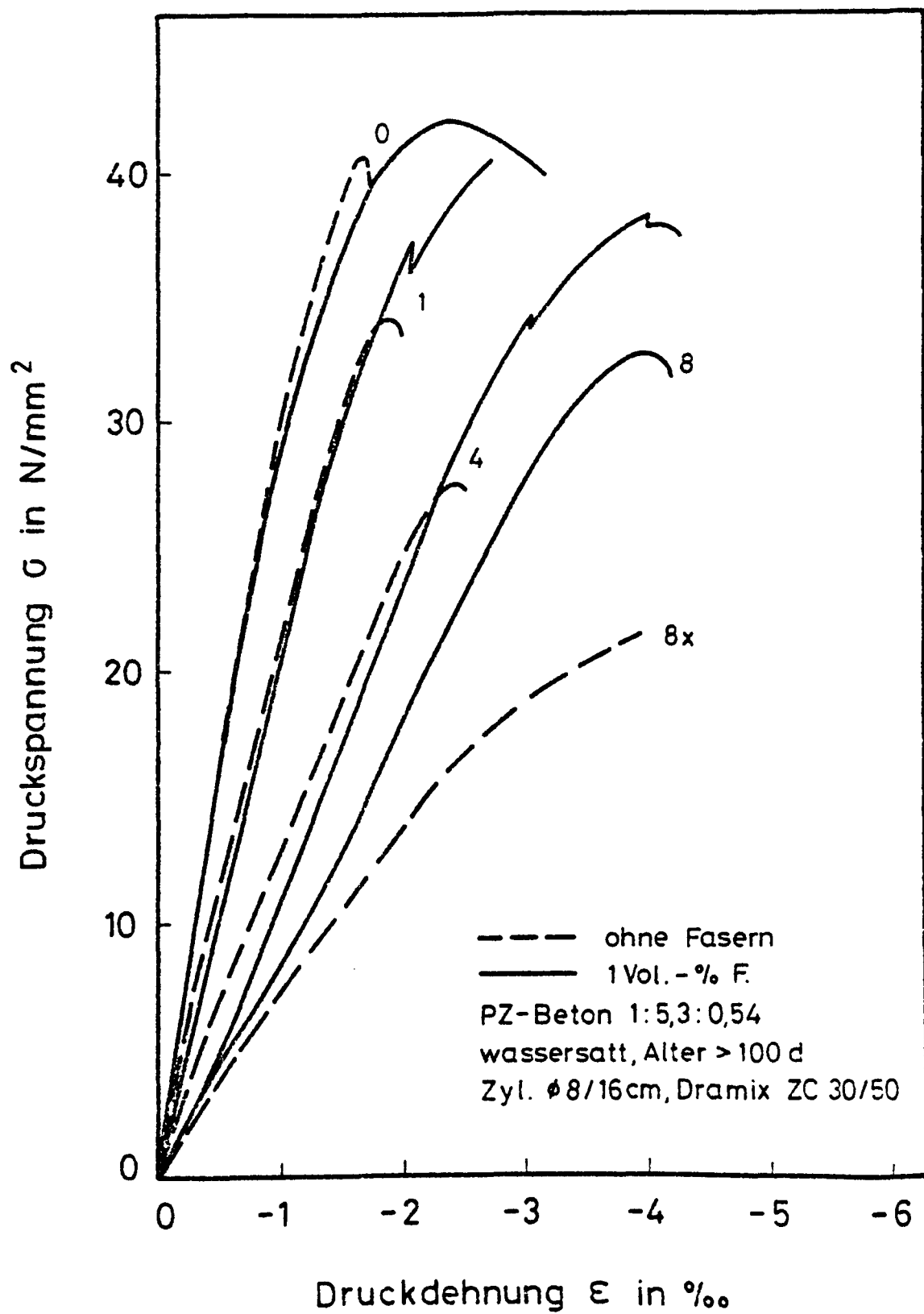


Bild 6.33

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
 PZ-Beton mit 1 % DRAMIX ZC 30/50

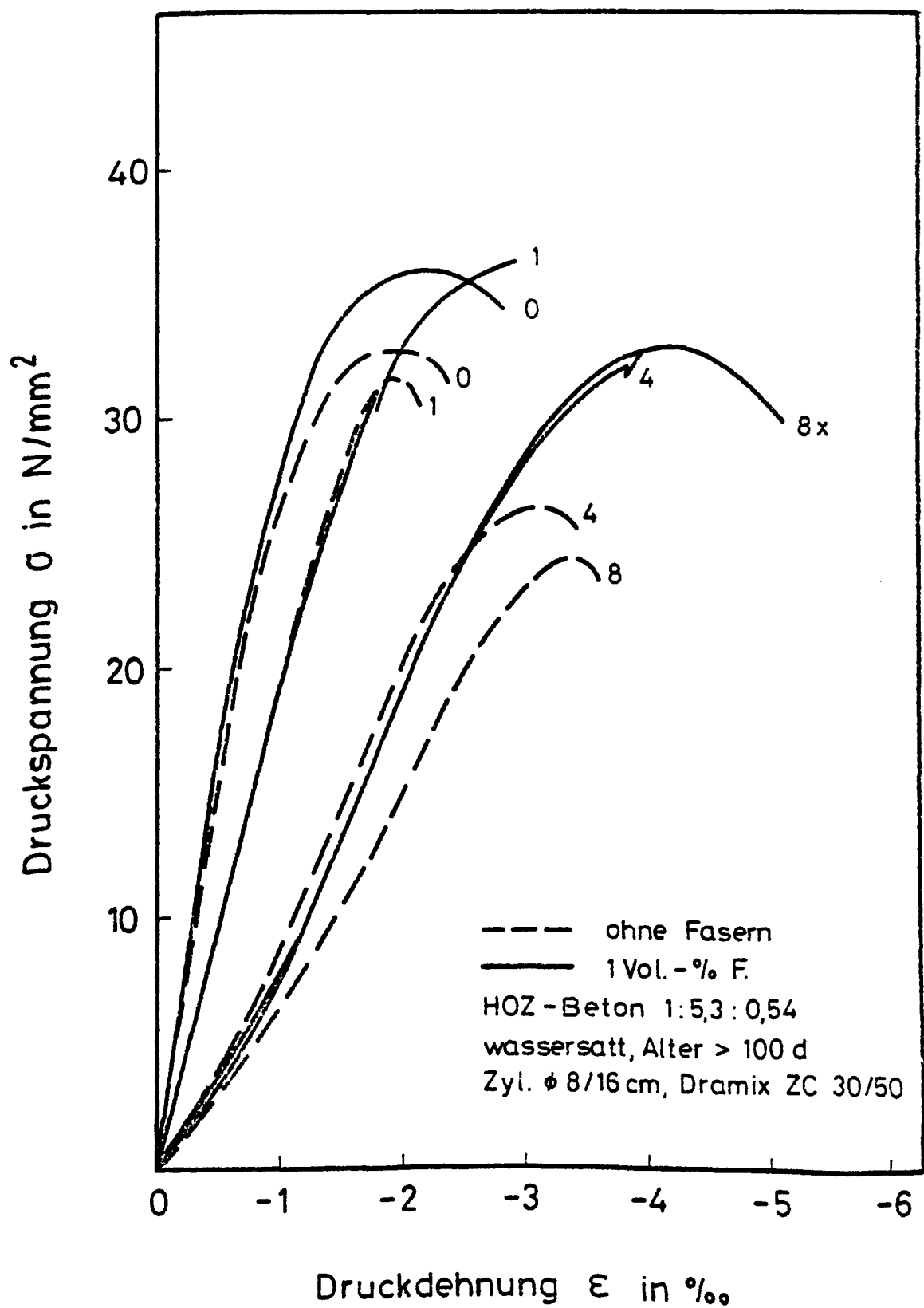


Bild 6.34

Spannungs-Dehnungslinien vor und nach TT-Zyklen.
HOZ-Beton mit 1 % DRAMIX ZC 30/50